

# LA CITTÀ COMPATTA IN CLIMA MEDITERRANEO: ISOLA DI CALORE, MORFOLOGIA E SOSTENIBILITÀ

---

The compact city in Mediterranean climate:  
Heat Island, Urban Morphology and Sustainability

**Agnese Salvati**

Tesi di Dottorato in cotutela

Relatori: **Prof. Ing. Carlo Cecere**  
**Prof. Arch. Helena Coch Roura**

Correlatore: **Prof. Ing. Paolo Monti**



**SAPIENZA Università di Roma**

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELL'ARCHITETTURA E URBANISTICA  
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale  
DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BarcelonaTECH**

ÀMBITS DE RECERCA EN L'ENERGIA I EL MEDI AMBIENT A L'ARQUITECTURA  
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona  
Departament de Tecnologia de l'Arquitectura

Roma, Maggio 2016





La tesi di ricerca è stata sviluppata in cotutela tra l'università Sapienza di Roma e l'UPC di Barcellona, nei gruppi di ricerca SOS\_UrbanLab e AiEM - Arquitectura, Energia y medio ambiente.

Vorrei ringraziare in primis i miei relatori, il Prof. Carlo Cecere, la Prof. Helena Coch Roura ed il Prof. Paolo Monti, per le loro preziose indicazioni, i consigli e lo stimolante confronto che ha permesso il raggiungimento di questo obiettivo.

Vorrei inoltre ringraziare tutti i colleghi di Roma e Barcellona che hanno contribuito a rendere entusiasmante e appassionante questo percorso.

Infine un ringraziamento speciale alla mia famiglia e ad Andrea, il cui sostegno incondizionato ha reso possibile più di ogni altra cosa il raggiungimento di questo traguardo.

In copertina : Barcellona dal drone, foto di Amos Chapple



## INDICE

ABSTRACT/RIASSUNTO/RESUMEN .....	II;
INTRODUZIONE / INTRODUCTION.....	17;
<b>I. CITTÀ, CLIMA, ENERGIA E SOSTENIBILITÀ .....</b>	<b>33</b>
1.1 Dal clima che “plasma” la città, alla città che modifica il clima .....	36;
1.2 Vulnerabilità dei sistemi urbani ai cambiamenti climatici: mitigazione e adattamento.....	44;
1.3 Densità, città compatta e città diffusa .....	52;
1.4 Sostenibilità urbana: la necessità di un cambio di scala .....	63
<b>2. ISOLA DI CALORE, MORFOLOGIA URBANA E DOMANDA ENERGETICA.....</b>	<b>71</b>
2.1 L'isola urbana di calore: il fenomeno e gli effetti .....	73
2.1.1. Entità del fenomeno nell'area mediterranea .....	74;
2.1.2. Clima urbano: scale di analisi e bilancio energetico .....	77;
2.1.3. Conseguenze energetiche a scala urbana .....	80;
2.1.4. Strategie di intervento per la mitigazione delle temperature .....	82;
2.1.5. Metodi di misurazione e strumenti di simulazione.....	83
2.2 Morfologia urbana, energia e microclima.....	86
2.2.1. Fenomeni termici indotti dalla morfologia urbana .....	87;
2.2.2. Morfologia dei canyon e temperatura dell'aria.....	88;
2.2.3. Morfologia urbana e domanda energetica .....	91;
2.2.4. Geometria urbana e comportamento energetico.....	93;
2.2.5. Geometria urbana e accesso solare.....	97;
2.2.6. Geometria urbana e ventilazione .....	99

## PARTE I : L'ISOLA DI CALORE NEL CONTESTO MEDITERRANEO

---

<b>3. ANALISI SPERIMENTALE DELL'ISOLA DI CALORE A ROMA E BARCELLONA.....</b>	<b>III</b>
3.1 Roma e Barcellona: aree metropolitane del contesto mediterraneo .....	113
3.1.1 Clima di riferimento .....	113;
3.1.2. Caratteristiche geografiche e morfologiche rilevanti .....	113;
3.1.3. Studi sull'isola di calore a Roma e Barcellona .....	115
3.2 Metodologia e fonte dei dati .....	119
3.2.1. Stazioni rurali di riferimento .....	119;
3.2.2. Stazioni urbane di riferimento .....	120;
3.2.3. Discussione dei risultati .....	123
3.3 Campagna di rilevazione a quota stradale .....	131
3.3.1. Metodo delle rilevazioni .....	131;
3.3.2. Risultati e discussione.....	135
3.4 Sintesi dei risultati e conclusioni .....	138

<b>4. MODELLAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE</b>	<b>143</b>
4.1 Urban Weather Generator	145
4.1.1. Accuratezza del modello	147;
4.1.2. Parametri e scale di riferimento	147
4.2 Validazione del modello UWG	150
4.2.1. Metodologia	150;
4.2.2. Calcolo dei parametri	150;
4.2.3. Discussione dei risultati	154;
4.2.4. Commento e conclusioni	159

## PARTE II: MORFOLOGIA URBANA E PERFORMANCE CLIMATICA ED ENERGETICA

<b>5. MORFOLOGIA URBANA E ISOLA DI CALORE</b>	<b>165</b>
5.1 Parametri morfologici e di densità del costruito	167;
5.2 Prestazione climatica dei tessuti edilizi in clima mediterraneo	171
5.2.1 Casi di studio e metodologia	171;
5.2.2 Discussione dei risultati	175
5.3 Parametri morfologici e isola di calore: uno strumento interpretativo	180
5.3.1 Metodologia	180;
5.3.2 Interpretazione analitica dei risultati	181;
5.3.3 Interpretazione grafica dei risultati	183;
5.3.4 Interpretazione fisico-morfologica dei risultati	185
5.4 Commento e conclusioni	186
<b>6. MORFOLOGIA URBANA E DOMANDA ENERGETICA</b>	<b>191</b>
6.1 Isola di calore e ripercussioni energetiche	193
6.1.1 Un caso di studio a Barcellona	193;
6.1.2 Discussione dei risultati	194
6.2 Performance energetica dei tessuti edilizi in clima mediterraneo	197
6.2.1 Metodologia	197;
6.2.2 Morfologia urbana e contributo indiretto	201;
6.2.3 Morfologia urbana e contributo diretto	204;
6.2.4 Morfologia urbana e contributo globale	207;
6.2.5 Commenti e conclusioni	211
<b>7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI / CONCLUSIONS AND FUTURE INVESTIGATION</b>	<b>215;</b>

## ALLEGATI

1. Analisi sperimentale dell'isola di calore: dati	229;
1.1 Dati climatici delle stazioni meteorologiche fisse	230;
1.2 Campagna di misurazione	238
2. Il modello UWG: moduli e parametri	243
2.1 Moduli di calcolo	244;
2.2 UWG: Parametri di input	251;
2.3 Individuazione delle variabili principali	253

3. Analisi di sensibilità del modello UWG .....	259
3.1 Metodologia .....	260;
3.2 Comparazione e discussione dei risultati .....	265
4. Validazione UWG: parametri di input .....	267
 BIBLIOGRAFIA .....	 281
 ELENCO DELLE FIGURE .....	 294
ELENCO DELLE TABELLE .....	298



## ABSTRACT

The era we are living calls us to face the environmental and urban issues. As the main source of greenhouse emissions and energy consumption, cities are as well the most vulnerable places as for the effects of climate change and energy scarcity. In densely built urban areas, this condition is exacerbated by the urban heat island effect, which causes higher air temperatures in urban areas than in the rural areas. Understanding the complex physical interaction between the building and the urban context is therefore a preliminary knowledge necessary to steer the urban transformation processes towards more sustainable cities.

The thesis investigates the relationship between urban morphology, heat island effect and energy demand in the Mediterranean climate. A set of analysis tools is presented, in order to highlight the direct and indirect relationships between the morphological parameters of the urban textures and the climatic and energetic performance at local scale. The results are based on experimental and computational, as applied to two main fields of investigation: the average intensity of the heat island in Rome and Barcelona and the variability of the climatic and energetic performance related to the urban morphology.

The experimental study of the heat island intensity was conducted by comparing the temperature data observed at different weather stations and the measurements taken at street level. The phenomenon is significant in both cities. At the street level, higher temperatures are recorded during the day, with an average maximum heat island intensity of more than 4 °C, both in winter and in summer. At roof level temperatures are lower, especially in summer, when the sea breeze moderates the phenomenon intensity.

The variability of heat island according to the different urban morphologies has been investigated through the "Urban Weather Generator" model, using a representative sample of urban textures as case studies. The analysis of the results shows two distinct relationships between the morphological parameters of urban textures and the summer and winter climatic performance. In winter the heat island is more intense in the urban morphologies characterized by a high "density of horizontal surfaces", in summer in those with high "density of vertical surfaces". Then, the energy performance of the urban textures was evaluated by means of EnergyPlus software; the obstruction of the solar radiation and the heat island effect determined by the urban context were both taken into account. In the Mediterranean climate, these two effects tend to balance out when the density of the urban texture reaches threshold values (site coverage ratio about 0.4, façade-to-site ratio about 1.6) ; beyond these values it is possible to take advantage of both the heat island effect on the heating demand and the radiation obstruction on the cooling demand, achieving a good performance throughout the year. As a result, it can be argued that a rather dense and compact urban layout may help to reduce energy demand in the Mediterranean climate, proving the validity of the principles of vernacular architecture and the efficiency of "density" in such a climatic context.

The many relationships found between the morphological parameters and the performance at local scale provide a fast and operative analysis tool for the recognition of the climatic and energetic vulnerability in the urban areas, based on readily available data. Further works would allow the identification of adequate design guidelines for energy renewal in each urban context, in order to direct the work of designers and planners toward more sustainable urban systems.





## RIASSUNTO

L'epoca che stiamo vivendo ci chiama al confronto con la questione ambientale ed urbana. Le città, che rappresentano la fonte principale delle emissioni e del consumo delle risorse non rinnovabili, sono anche il luogo di maggior vulnerabilità rispetto ai rischi connessi al cambio climatico ed alla questione energetica. Nelle aree urbane densamente costruite, tale condizione è ulteriormente aggravata dall'effetto dell'isola di calore, che comporta un aumento della temperatura dell'aria rispetto alle zone non urbanizzate. La comprensione della complessità dei fenomeni fisici-energetici che si instaurano tra l'edificio ed il contesto rappresenta pertanto una base conoscitiva indispensabile per indirizzare processi di trasformazione urbana verso modelli di maggiore sostenibilità.

La tesi di dottorato indaga le relazioni tra morfologia urbana, isola di calore e domanda energetica in clima Mediterraneo, presentando un insieme di strumenti di analisi che evidenziano le relazioni, dirette e indirette, tra i caratteri morfologici dei tessuti edilizi e la prestazione climatica ed energetica a scala locale. I risultati conseguiti si basano su analisi sperimentali e modellazioni che riguardano due ambiti principali di indagine: l'intensità media di isola di calore a Roma e Barcellona e la variazione della prestazione climatica ed energetica in funzione della morfologia dei tessuti edilizi.

Lo studio sperimentale dell'isola di calore è stato condotto mediante comparazione di dati di temperatura osservati a diverse stazioni meteorologiche e con misurazioni alla quota stradale. Il fenomeno risulta rilevante in entrambe le città. Alla quota stradale le temperature sono maggiori durante il giorno, con un'intensità media massima di isola di calore di oltre 4°C sia in inverno che in estate. Alla quota dei tetti il fenomeno è più moderato, soprattutto in estate, grazie all'effetto mitigatore della brezza marina.

La variabilità dell'isola di calore in funzione della morfologia dell'edificato è stata studiata attraverso modellazioni con il software Urban Weather Generator, basate su un campione rappresentativo di tessuti urbani. L'analisi dei risultati evidenzia due relazioni distinte tra i parametri morfologici dei tessuti edilizi e la prestazione climatica estiva ed invernale. In inverno l'isola di calore è più intensa nei tessuti caratterizzati da un elevato grado di "densità di superfici orizzontali", in estate in quelli con maggiore "densità di superfici verticali". Mediante modellazioni energetiche con il software Energyplus, è stata inoltre valutata la performance energetica dei tessuti edilizi, tenendo in considerazione il grado di ostruzione della radiazione solare e l'effetto di isola di calore indotti dal contesto. Nel clima mediterraneo, questi due effetti tendano a bilanciarsi quando la densità del tessuto raggiunge dei valori di soglia (rapporto di copertura circa 0.4 e rapporto di facciata circa 1.6), oltre i quali è possibile beneficiare dell'isola di calore sulla domanda di riscaldamento e dell'ostruzione della radiazione solare sulla domanda di raffrescamento, ottenendo una buona performance durante tutto l'anno. Si può pertanto affermare che una struttura urbana sufficientemente densa e compatta contribuisca a contenere la domanda energetica in clima Mediterraneo, comprovando la validità delle strategie messe in campo dall'architettura vernacolare presente in tale contesto climatico.

Più in generale, in conclusione, l'insieme delle relazioni individuate si configura come uno strumento speditivo d'indagine urbana, utile per la redazione di mappe di vulnerabilità climatica ed energetica sulla base di dati facilmente reperibili e misurabili. Ulteriori sviluppi della ricerca consentirebbero l'individuazione di linee guida di intervento adeguate a ciascun contesto urbano, in maniera tale da favorire l'efficacia del lavoro di progettisti e pianificatori verso la diminuzione dell'impatto energetico ed ambientale della città esistente



## RESUMEN

La época que estamos viviendo nos llama a enfrentar las cuestiones ambientales y urbanas. Las ciudades, que son la fuente principal de emisiones y de consumo de recursos no renovables, son también los lugares más vulnerables a los riesgos relacionados con el cambio climático y la cuestión energética. En las áreas urbanas densas, esta condición es aún más perjudicial por el efecto de isla de calor, lo que produce un aumento de la temperaturas respecto a la de las zonas rurales limítrofes. La comprensión de la complejidad de los fenómenos físico-energético que se establecen entre el edificio y el contexto urbano es, por tanto, una base de conocimiento necesaria para establecer criterios de intervención hacia modelos de mayor sostenibilidad.

La tesis doctoral investiga las relaciones entre morfología urbana, isla de calor y demanda energética en el clima mediterráneo, presentando un conjunto de herramientas de análisis que destacan las relaciones, directas e indirectas, entre las características morfológicas de los tejidos urbanos y el comportamiento climático y energético a la escala local. Los resultados se basan en análisis experimentales y simulaciones sobre dos áreas principales de investigación: la intensidad media de la isla de calor en Roma y Barcelona y en rendimiento energético y climático en relación a las características morfológicas de los tejidos.

El estudio experimental de la isla de calor se llevó a cabo mediante la comparación de datos de temperatura observados en diferentes estaciones meteorológicas y mediciones a nivel de la calle. El fenómeno es relevante en ambas ciudades. Al nivel de la calle, las temperaturas son mayores durante el día, con una intensidad media máxima de isla de calor de más de 4 °C en invierno y en verano. Al nivel de las cubiertas el fenómeno es más moderado, especialmente en verano, debido al efecto mitigador de la brisa marina.

A través de simulaciones con el modelo "Urban Weather Generator" se estudió la variabilidad de la isla de calor en función de la morfología urbana, tomando una muestra representativa de tejidos como casos de estudio. Se destacaron dos relaciones distintas entre los parámetros morfológicos y el comportamiento climático en verano y invierno. En invierno la isla de calor es más intensa en los tejidos urbanos que se caracterizan por alta "densidad de las superficies horizontales", en cambio en el verano en los que tienen mayor "densidad de las superficies verticales". Mediante simulaciones con el programa de cálculo EnergyPlus, se evaluó también la eficiencia energética de las diferentes tramas, teniendo en cuenta la obstrucción de la radiación solar y el efecto de isla de calor inducido por el contexto. En el clima mediterráneo, estos dos efectos se compensan cuando la densidad del tejido alcanza unos valores umbral (índice de ocupación aproximadamente 0,4 y densidad de fachadas aproximadamente 1,6), por encima de los cuales se puede beneficiar de la isla de calor en la demanda de calefacción y de las obstrucciones de la radiación solar en la demanda de refrigeración, logrando un buen rendimiento durante todo el año. Por lo tanto, se puede afirmar que una estructura urbana suficientemente densa y compacta puede contribuir a la reducción de la demanda de energía en el clima mediterráneo, lo que demuestra la validez y la eficiencia de los principios de arquitectura y urbanismo tradicionalmente presentes en este contexto climático.

El conjunto de relaciones encontradas proporciona herramientas de análisis adecuadas para el reconocimiento de la vulnerabilidad climática y energética a escala urbana, sobre la base de datos morfológicos fácilmente disponibles. Basándose en estas pautas de funcionamiento, otros desarrollos de la investigación permitirían la identificación de las actuaciones más eficaces por cada contexto urbano, con el fin de dirigir el trabajo de arquitectos y planeadores hacia la reducción del impacto ambiental de las ciudades.

*Los edificios son barreras a la lluvia, al viento y, a veces, filtros sutiles a la luz y al calor. Rodeados de entornos variables, donde cambian el día y la noche, el calor y el frío, el viento y la calma, la lluvia y el sol; se convierten en refugios de artificiales condiciones, como islas de tranquilidad en un mundo incómodo”*

*(Rafael Serra, Arquitectura y Cimas)*

*Con l'estate, forse perché sono ancor giovane e non mi sono ancora adattato al fatto d'esser marito e padre di famiglia, mi viene sempre la voglia di fuggire. D'estate, nelle case dei ricchi, si chiudono le finestre alla mattina e l'aria fresca della notte rimane nelle stanze ampie e oscure, dove, nella penombra, brillano specchi, pavimenti di marmo, mobili lucidati a cera. Tutto è a posto, tutto è pulito, riposante, buio. Se poi hai sete, ti portano su un vassoio una bella bibita gelata, un'aranciata, una limonata, dentro un bicchiere di cristallo in cui i blocchetti di ghiaccio, a rimescolarli, fanno un rumore allegro che da solo ti rinfresca. Ma nelle case dei poveri le cose vanno diversamente. Col primo giorno di caldo, l'afa entra nelle tue stanzette affogate e non se ne va più via. Vuoi bere ma dal rubinetto, in cucina, viene giù un'acqua calda che pare brodo. In casa non ti puoi più muovere: sembra che ogni cosa, mobili, vestiti, utensili, si sia gonfiata e ti caschi addosso. Tutti stanno in maniche di camicia, ma le camicie sono sudate e puzzano. Se chiudi le finestre, soffochi perché l'aria della notte non ce l'ha fatta ad entrare in quelle due o tre stanze dove dormono sei persone; se le apri, il sole t'inonda e ti pare d'essere in strada e tutto sa di metallo bollente, di sudore e di polvere. Col caldo, anche i caratteri si scaldano, voglio dire diventano litigiosi: ma il ricco, se gli gira, prende e se ne va in fondo all'appartamento, tre stanze più in là; i poveri, invece, rimangono davanti ai piatti unti e ai bicchieri sporchi, naso a naso; oppure debbono andar via di casa.*

*(Moravia, Racconti romani: Scherzi del caldo)*

---

# INTRODUZIONE

## INTRODUCTION

## INTRODUZIONE

La questione ambientale costituisce una sfida e un impegno improrogabile per la società del XXI secolo. Le conseguenze ambientali derivanti dall'impiego eccessivo di fonti energetiche fossili e dal consumo smisurato di risorse naturali non rinnovabili ha già condotto ad un punto di non ritorno rispetto ai processi di rigenerazione degli ecosistemi naturali e alle possibilità di adattamento degli habitat umani ai cambiamenti climatici in corso.

Le conseguenze ambientali prodotte dalla globalizzazione del sistema di sviluppo occidentale sono evidenti oggi in tutte le aree del globo, dove l'urbanizzazione indiscriminata del territorio e la frequenza di eventi meteorologici estremi ed imprevedibili produce impatti sociali ed economici sempre più preoccupanti ed irreversibili.

Un approccio efficace alla odierna questione ambientale necessita di un impegno trasversale e multidisciplinare da parte di tutti i settori della società civile, che possa contribuire alla creazione di un immaginario collettivo e condiviso di maggiore sostenibilità ambientale e sociale, invertendo la tendenza autodistruttiva del perdurare di un modello di sviluppo fondato sulla crescita illimitata.

Le città rappresenta il nodo cruciale della questione ambientale ed energetica.

Le eccessive emissioni in atmosfera dei cosiddetti gas serra sono in gran parte dovute al comportamento non virtuoso delle aree urbane, dove si concentra la quota preponderante di consumi energetici, legati al trasporto e alla climatizzazione degli edifici. Le aree urbane, inoltre, accolgono già oggi più del 50% della popolazione mondiale (United Nations, 2014) e risultano particolarmente vulnerabili agli eventi climatici estremi e alle conseguenze di un eccessivo consumo energetico, dato il basso grado di resilienza e l'alto livello di esposizione della popolazione.

Una delle più evidenti e documentate conseguenze dello sfruttamento indiscriminato di risorse energetiche e naturali da parte dell'uomo è, senza dubbio, l'innalzamento delle temperature nelle aree urbane, noto come isola urbana di calore. E' stato ampiamente rilevato che la presenza di estese aree urbanizzate provoca cambiamenti tangibili sul clima urbano, principalmente a causa dell'impermeabilizzazione del suolo e della densità dell'edificato, che alterano il ciclo delle acque, il regime di ventosità e gli scambi termo-radiativi tra superficie terrestri e atmosfera. Oltre agli stress termici e alle ripercussioni accertate sulla salute dei cittadini, nei climi caldi l'isola di calore comporta un incremento notevole della domanda di raffrescamento che può arrivare a compromettere il regolare funzionamento delle reti di approvvigionamento energetico.

La comprensione del comportamento fisico ed energetico degli ambienti urbani rappresenta pertanto un campo di ricerca di estrema attualità. Le città costituiscono un sistema fisico complesso i cui effetti influiscono sia su fenomeni a grande scale, quali il cambiamento climatico

## INTRODUCTION

The environmental issue is a challenge that cannot be more delayed in the society of the twenty-first century. The consequences due to the excessive use of fossil fuels and the huge consumption of nonrenewable natural resources has already led to a point of no return with regard to the processes of regeneration and adaptation of the natural ecosystems and the human habitats to climate change.

The globalization of the western development system is responsible of evident environmental damages in almost all the areas of the globe, where the extensive urbanization of the land together with the frequency of extreme and unpredictable weather events produce increasingly alarming and irreversible social and economic impacts.

A successful approach to the issue needs a cross-disciplinary commitment, by all the sectors of the civil society, in order to create a collective consciousness toward a greater environmental sustainability, reversing the self-destructive tendency of the actual development pattern based on unlimited growth.

Cities are the heart of the environmental and energy issue.

The excessive greenhouse emissions are largely due to the non-virtuous behavior of the urban areas, where most of the energy consumptions are concentrated, such as transportations and the buildings' heating and cooling.

Furthermore, today 50% of the world population live in urban areas (United Nations, 2014) and all the projections foresee an increase of urban population. This makes cities particularly vulnerable to extreme weather events, as to the consequences of excessive energy consumption, given the low resilience of the system and the high exposure level of the population.

The increase of air temperatures in urban areas is indeed one of the clearest and documented consequences of the indiscriminate exploitation of energy and natural resources by man. The phenomenon is known as "Urban heat island". It has been widely proved that the presence of extensive urbanized areas modifies the urban climate with respect to the rural environments. The extensive soil sealing and the building density alter the water cycle, the wind regime and the radiative exchanges between the earth's surface and the atmosphere, causing an increase of the temperatures.

Warmer temperatures cause thermal discomfort and health risks for citizens, but also a significant increase of the cooling demand, especially in hot climates, where the energy impact of the heat island can even compromise the normal operation of energy supply networks

In this context, the physics and the energy behavior of the built environment is a very useful research topic. Cities are complex physical systems, whose functioning affects large scale phenomena, such as global climate change, and local scale phenomena, as the urban heat island, the building energy performance or the thermal comfort in indoor and outdoor spaces.

globale, sia a scala locale, interessando il comportamento energetico e climatico dell'edificato e degli spazi urbani di relazione.

La scala urbana rappresenta storicamente un ambito di studio complesso in cui convergono differenti discipline quali la sociologia, l'antropologia, l'economia, l'architettura e l'urbanistica. A questa complessità si aggiunge oggi una sempre maggiore consapevolezza della necessità di integrare le discipline "tradizionali" con un corpo di discipline "nuove", quali la climatologia, la fisica urbana, la meteorologia, l'informatica, che si rendono necessarie alla comprensione di fenomeni energetici e ambientali urbani, di cui ancora oggi è difficile comprendere le dinamiche e gli impatti su larga scala. La città rappresenta pertanto un campo di studio sempre più inter-disciplinare, in cui l'architettura e la pianificazione urbana devono assumere un ruolo diverso rispetto al passato. Non dobbiamo infatti dimenticare che l'edilizia costituisce il settore maggiormente responsabile del consumo energetico globale, con un'incidenza pari al 40% dell'utilizzo di energia nel mondo occidentale, di cui il 50% imputabile alla diffusione crescente dei sistemi di raffrescamento (Pérez-Lombard et al. 2008).

Agire efficacemente sulla domanda energetica a scala urbana significa quindi intaccare la fonte principale di consumo di risorse e produzione di CO<sub>2</sub>, costituita in gran parte dal fabbisogno energetico del costruito per soddisfare le esigenze di comfort estivo ed invernale. Ciò implica la necessità di un approccio inter-disciplinare nella pratica dell'edilizia, attraverso l'introduzione di adeguati modelli di analisi che possano consentire la comprensione dei fenomeni energetici urbani e la prefigurazione dell'efficacia delle strategie progettuali.

**Il presente lavoro di ricerca contribuisce alla strutturazione di un corpo di conoscenze del comportamento ambientale del costruito nel contesto urbano, con l'obiettivo di fornire a pianificatori, decisori e progettisti basi scientifiche e strumenti affidabili che consentano la scelta delle strategie più idonee al raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico e riduzione delle emissioni inquinanti a scala urbana.**

Allo stato attuale, le soluzioni progettuali e le normative deputate ad incrementare la *sostenibilità* del settore edilizio rivelano un approccio ancora miope, inefficace ed illusorio. Sulla base delle Direttive Europee, gli interventi per il "risparmio energetico" si sono tradotti in una *formula* universalmente applicata in tutti i paesi dell'Unione, che prevede l'incremento dell'isolamento e dell'efficienza degli impianti e, nei casi più virtuosi, l'introduzione più o meno integrata di fonti energetiche rinnovabili. Tale approccio in primo luogo nega qualsiasi specificità climatica locale, penalizzando soluzioni bioclimatiche passive differenziate in funzione delle necessità energetiche di ciascun contesto climatico. Inoltre rivela la scelta di voler proseguire sulla strada dell'espansione e della crescita, attraverso l'incentivazione di soluzioni volte al contenimento dei consumi, ma non alla diminuzione della domanda.

Anche gli strumenti di valutazione della prestazione energetica risultano ancora largamente carenti. La normativa prevede la redazione di una "certificazione energetica" *ex post* dell'edificio, che si limita a valutare, in maniera alquanto approssimata, le migliori energetiche apportate da interventi sugli impianti o sulle prestazioni termiche dell'involucro, omettendo completamente la valutazione delle interrelazioni energetiche che si producono tra l'interno e l'esterno dell'edificio nel contesto urbano.

Infine le risorse investite nel campo della sostenibilità del settore edilizio appaiono ancora esigue rispetto all'entità del problema, e si traducono in "incentivi economici" che premiano azioni puntuali di sostituzione tecnologica. Dall'altro canto gli investimenti e la realizzazione di edifici a energia (quasi) zero e quartieri "sostenibili" costituiscono un contributo insignificante nei confronti della quota preponderante dei consumi determinati dal costruito esistente, che nel contesto europeo prevale nettamente sui nuovi insediamenti.

L'incremento dei consumi energetici e dello sfruttamento delle risorse naturali prodotto negli ultimi decenni è pertanto il risultato del perdurare di un modello socioeconomico espansivo a cui si è tentato di porre rimedio solo incentivando l'efficienza dei sistemi, senza l'introduzione di politiche efficaci di riduzione della domanda. Tale approccio risulta inefficace ed illusorio,



Though so, nowadays we have the awareness that we have to face this complexity integrating the "traditional" disciplines with a "new" body of knowledge, such as climatology, urban physics, meteorology or computer science. This integration is necessary to the understanding of the energy phenomena that take place in the urban environment, whose large-scale impacts are still quite unknown and difficult to detect.

In the new interdisciplinary approach to the urban issue, architects, engineers and urban planners must play a different role than in the past.

We must not forget that the buildings are responsible for large part of the global energy consumption, about 40% of the energy use in the Western countries, of which 50% is due to the increasing spread of cooling systems (Pérez -Lombard, Ortiz, & Pout, 2008).

The reduction of the energy demand at urban scale could effectively decrease the amount of greenhouse emissions related to the energy expenditures for the comfort in the buildings.

To achieve this, architects and engineers have to change their approach to building design and rehabilitation, through the introduction of appropriate interdisciplinary knowledge that allow the understanding of the building behavior into the urban environment, and to foreshadow the efficacy of the design strategies.

**This research contributes to the creation of an interdisciplinary body of knowledge on the buildings' environmental behavior in the urban context. The aim is to provide architects, decision-makers and urban planners with scientific basis and analysis tools to enable the choice among the most suitable design strategies to achieve the targets of energy saving and emissions reduction at urban scale.**

Until now, the design solutions and the energy policies to foster architecture sustainability have been weak, ineffective and illusory. The energy codes set by the European Union have indeed contributed to reduce the design solutions for the building energy saving into a "formula" universally applied to all the EU countries, despite the climatic differences. The formula consists in providing isolation, increasing the plants efficiency and, in the most virtuous cases, introducing renewable energy systems in the buildings skin. On the one hand, this approach denies any local climatic specificity, penalizing other passive bioclimatic solutions that can be more suitable according to the energy needs of each climatic context. On the other hand, it reveals the choice to continue to follow the model of expansion and growth, through the encouragement of solutions aimed at containing consumptions, but not at decreasing the energy demand.

Even the energy assessment procedures are still largely lacking. The EU code prescribes the "Energy performance certification" for each building, which is a rather approximate assessment of the performance and of the energy improvements made to the systems or to the building envelope, omitting completely the energy interactions between indoor and outdoor in the urban context.

Finally, the investments on buildings' sustainability are still irrelevant compared to the size of the problem. The incentive schemes mainly reward individual actions of technological rehabilitation. At the same time, the investments on (almost) zero energy buildings and sustainable neighborhoods represent an insignificant contribution compared to the percentage of energy consumption related to the existing buildings, which clearly prevail on the new developments in the European context.

The present energy and environmental crisis is thus the result of the persistence, in the last decades, of the socio-economic model of indefinite growth, to which the only solution has been the increase of the systems' efficiency, without any other effective policy of demand reduction.

This approach is proved to be ineffective and illusory, since an increase in efficiency does not necessarily entail a reduction in consumption (De Pascali, 2008). Moreover, the current crisis reminds us once again, this time with a longer prospect, that the limits to growth are

in quanto un aumento dell'efficienza non è detto che comporti una riduzione dei consumi (De Pascali, 2008). Inoltre la crisi che stiamo vivendo ci ricorda ancora una volta, ed oggi con una prospettiva di più lunga durata, che i limiti della crescita sono intrinsecamente segnati dai limiti delle risorse e dello sviluppo (Meadows & Club of Rome, 1972).

*Ciò che in genere si perde di vista è che l'equità e l'energia possono crescere parallelamente solo sino a un certo punto. Al di sotto di una certa soglia di watt pro capite, i motori forniscono condizioni migliori per il progresso sociale. Al di sopra di quella soglia, l'energia cresce a spese dell'equità<sup>1</sup> (Ivan Illich, 1974).*

Senza un'inversione di tendenza della curva della domanda energetica risulta pertanto difficile pensare di riuscire ad adempiere agli impegni presi dall'Europa di abbattere le emissioni di gas serra del 20% entro il 2020 rispetto ai valori del 1990 (European Commission, 2010). Ancora più lontano appare invece la prospettiva di una quasi completa de-carbonizzazione dell'Europa, attuando la "Roadmap" che dovrebbe portare ad una riduzione tra l'80 e il 95% delle emissioni nel 2050 rispetto ai livelli del 1990. Gli impegni assunti dai vari Paesi alla conferenza internazionale sul clima di Parigi (COP 21) appaiono ugualmente poco convincenti, data l'eliminazione della prospettiva di de-carbonizzazione dall'accordo e la mancanza di un qualsivoglia vincolo legale rispetto all'adempimento degli impegni da parte dei Paesi firmatari.

Ciò che si intende sottolineare con il presente studio è che per raggiungimento di tali obiettivi occorre in primo luogo comprendere le dinamiche fisico-energetiche che si instaurano in un contesto urbano, sviluppando un corpo interdisciplinare di conoscenze che permetta di programmare strategie di risparmio energetico che siano efficaci su larga scala e su lunga durata.

Il lavoro di progettisti e pianificatori deve necessariamente confrontarsi ed integrarsi con un corpo di conoscenze più ampio, che indaga le relazioni energetiche e climatiche dei sistemi urbani. Allo stesso tempo deve rifuggire all'idea che la dotazione di dispositivi "smart" o impianti da fonte rinnovabile possa sopperire a strategie di diminuzione della domanda del costruito esistente e garantire la sostenibilità dell'intervento. **Le dinamiche energetiche che contribuiscono alla determinazione della domanda di un edificio in ambito urbano coinvolgono una scala maggiore di quella dell'edificio, di cui occorre prendere coscienza per poter partecipare alla sfida della sostenibilità.**

La comprensione dei fenomeni urbani, anche climatici ed energetici, suggerisce un rinnovato interesse per la "vecchia" categoria di analisi della densità, che nell'ambito dell'architettura e della pianificazione racchiude numerose potenzialità come strumento di analisi della sostenibilità. La densità dell'edificato costituisce infatti una variabile strettamente correlata alla prestazione energetica, climatica e ambientale a scala urbana.

Nel dibattito disciplinare internazionale, la categoria della densità è stata spesso utilizzata per evidenziare gli impatti energetici, ambientali e sociali prodotti dalla dispersione abitativa. Il primo approccio scientifico volto a quantificare i costi collettivi, in termini economici, energetici ed ambientali, associati alla conformazione spaziale e funzionale dell'insediamento fu definito dal celebre studio "The cost of sprawl" (Real Estate Research Corporation, 1974). Sulla base degli studi pionieri degli anni '70, si afferma l'idea che la "città compatta" sia più "sostenibile", in quanto consente un utilizzo più razionale delle risorse economiche ed ambientali, mediante la riduzione dei consumi per il trasporto e di quelli necessari alla climatizzazione degli edifici.

Tuttavia, i concetti di "densità" e "città compatta" risultano alquanto controversi, assumendo accezioni a volte quantitative e a volte qualitative a seconda che vengano relazionati con la sfera sociale e percettiva degli abitanti o con le prestazioni energetiche e ambientali (De

<sup>1</sup> *"What is generally overlooked is that equity and energy can grow concurrently only to a point. Below a threshold of per capita wattage, motors improve the conditions for social progress. Above this threshold, energy grows at the expense of equity", Ivan Illich, Energy and Equity, 1974, Harper and Row publisher, New York, p.5*

intrinsically marked by finite resource supplies and social development (Meadows & Club of Rome, 1972).

*"What is generally overlooked is that equity and energy can grow concurrently only to a point. Below a threshold of per capita wattage, motors improve the conditions for social progress. Above this threshold, energy grows at the expense of equity", (Ivan Illich, 1974).*

Actually, without a reversal of the energy demand trend it seems very hard the possibility to achieve the goals set by the EU to break down 20% of greenhouse gas by 2020 compared to 1990 (European Commission, 2010). The prospect of the "Roadmap" toward complete de-carbonization of Europe, which should lead to a reduction between 80 and 95% of emissions in 2050, appears even more difficult. The commitments to stop the climate change taken from the various countries at the conference in Paris (COP 21) appear equally weak, given the elimination of the de-carbonization prospect and the lack of any legal obligation to the fulfillment of the commitments taken from the signatory countries.

This study highlights the importance to develop an interdisciplinary body of knowledge on the energy dynamics that establish in the urban environment, in order to achieve the above mentioned objectives through energy saving strategies that are effective on a large scale and on a long term.

Architects and planners must necessarily integrate their background with a wider body of knowledge, that investigates energy and climate dynamics of the urban systems. At the same time, they must avoid the practice of facing the sustainability issue by only providing the project with "smart" devices or renewable energy systems, instead of design solutions that can reduce the building energy demand. **The prerequisite to face the challenge of urban sustainability is the awareness that the building energy demand is determined by physical dynamics that take place at greater scale than that of the single building.**

The scale of analysis of urban phenomena, even climatic and energetic, suggests a renewed interest in the concept of "density", which in architecture and urban planning has shown many potentials as a sustainability analysis tool. In effect, the buildings' density is closely related to the climate, energy and environmental performance at urban scale.

In the international academic debate, the concept of density has been often used to highlight the detrimental consequences of sprawl. "The cost of sprawl" (Real Estate Research Corporation, 1974) was the first scientific work aimed at quantifying the social, economic, energy and environmental costs for the community related to different spatial and functional conformations of the settlement.

Since then, other studies were developed during the 70s that led to the concept of the "compact city" as a sustainability model against the sprawl. The compact city is supposed to be more environmental friendly as it allows a rational use of the resources, enabling the reduction of the consumptions due to transportations and buildings' cooling.

However, the concepts of "density" and "compact city" are rather ambiguous; they can indifferently assume "quantitative" or "qualitative" meanings, depending on the terms of relations, which can be the social sphere, the citizens' perception or the energy and environmental performance (De Pascali, 2008).

**In addition, even though the environmental implications of the sprawl are universally recognized, only few studies assessed the correlation between density parameters and energy consumption.** If it is clear that there is a relationship between "urban form" and "energy performance", it is not as much clear their mutual interrelation, given the complexity of the energy and climate phenomena that characterize the urban scale.

**This study contributes to fill this gap, by providing a quantitative analysis of the direct and indirect relationships between the urban density and the buildings energy perfor-**

Pascali, 2008).

Inoltre, sebbene le implicazioni ambientali della dispersione abitativa siano universalmente condivise, pochi studi si sono dedicati all'analisi quantitativa del rapporto diretto tra densità e consumo energetico. Se da un lato risulta chiara l'esistenza di una relazione tra "forma urbana" e "energia", la comprensione della loro interdipendenza non è altrettanto semplice alla luce della complessità dei fenomeni energetici e climatici che si instaurano alla scala urbana.

**Il presente studio contribuisce a colmare tali carenze, mediante un'indagine quantitativa e analitica delle relazioni dirette e indirette tra la densità urbana e le prestazioni energetiche dell'edificato.**

**L'avanzamento prodotto rispetto alle criticità esposte consiste nell'individuazione di leggi di variazione affidabili tra gli indici di densità che descrivono la consistenza dell'edificato e gli indici energetici e climatici che ne descrivono la prestazione.**

I risultati della ricerca permettono di rispondere a questioni di ordine teorico e operativo:

**Possiamo realmente affermare che la città compatta sia più efficiente e sostenibile? Come influiscono morfologia e densità urbane sul bilancio energetico della città? Esistono strumenti di modellazione e simulazione che possano consapevolmente avvalorare tali affermazioni?**

Confrontarsi con le problematiche della sostenibilità ambientale ed energetica a scala urbana implica il superamento di un approccio esclusivamente incentrato sull'analisi del sistema tecnologico e costruttivo dell'edificio in favore di una ricerca volta a comprendere il comportamento globale del sistema urbano.

**A tal fine il presente studio definisce strumenti e modelli di analisi e prefigurazione dei fenomeni climatici ed energetici che investono la scala del tessuto urbano, in cui i parametri di morfologia e densità assumono un valore descrittivo e analitico della prestazione climatica ed energetica.**

**Alla scala del tessuto edilizio è possibile valutare l'effetto della densità e della morfologia del costruito su clima locale e sulla variazione della domanda energetica utilizzando parametri di densità ed indici energetici comuni alla pratica della progettazione e pianificazione e permettendo una valutazione speditiva ed efficace rispetto ad un approccio che analizza "caso per caso" il comportamento dei singoli edifici.**

La scala di tessuto rappresenta inoltre un dominio di analisi utile sia rispetto a fenomeni a scala urbana, quali l'isola di calore, sia sulle prestazioni dei singoli edifici che sono reciprocamente condizionate dal contesto climatico e geometrico circostante. La morfologia dei tessuti urbani riveste infatti un ruolo determinante rispetto all'entità della domanda energetica dell'edificato, incidendo sia sull'accesso solare degli edifici che sull'andamento delle temperature urbane.

Tale considerazione fa emergere una ulteriore contraddizione: sebbene la città densa e compatta risulti più efficiente nei confronti dello sfruttamento delle risorse rispetto ad una configurazione diffusa, allo stesso tempo la "densità di superfici antropizzate" a scapito di "superfici naturali" comporta una profonda alterazione del bilancio energetico rispetto agli ambienti rurali o poco urbanizzati.

I numerosi studi sulla modellazione del clima urbano costituiscono quindi un elemento di riferimento fondamentale per la valutazione dell'impatto energetico e ambientale delle estese aree



**Figura 1** ROADMAP 2050. Fonte: OMA per European Climate Foundation, 2010

mance.

**The original contribution of the work consists in the identification of different analytical correlations among density parameters and energy or climatic indices, in order to assess the performance of different urban morphologies.**

The outcomes of the research can be useful to theoretical and operational issues.

**Can we really say that the compact city is more efficient and sustainable? How do urban morphology and density effect the energy balance of the city? Are there any models and simulation tools that can clearly prove these statements?**

Dealing with environmental and energy sustainability at urban scale needs a change of focus: from the analysis of the single building's technological and structural system toward an inter-disciplinary approach aimed at understanding the global behavior of the urban system.

**To this end, this study defines a methodological framework of analysis tools to analyze the climatic and energy phenomena that characterize the urban texture's scale, using density parameters as descriptors of the urban morphologies' performance.**

The focus on the urban texture scale allows to assess the effect of different building density and morphology on the urban climate and on the building energy demand, by using density parameters and energy indices commonly used in urban planning, so to enable rapid assessment of the buildings' performance in the urban context, avoiding the analysis "case by case" of individual buildings.

Furthermore, the urban texture scale provides useful information about urban scale phenomena, such as the heat island, but even on the individual buildings performance, that are mutually conditioned by the climate and the morphology of the urban context.

The urban texture morphology and density play indeed an important role in the determination



urbanizzate che caratterizzano il nostro territorio. **Il limite che si riscontra negli strumenti di modellazione climatica è che operano ad una scala di analisi troppo vasta rispetto al settore della progettazione e necessitano di molteplici dati di ingresso che ne limitano la diffusione nel settore edilizio.**

Ma allo stesso tempo, i dettagliati strumenti di simulazione del comportamento energetico a scala di edificio utilizzano dati climatici ottenuti normalmente in campo aperto e rurale (aeroporti), che non tengono in conto dell'effetto di isola di calore e pregiudicando notevolmente l'affidabilità e l'accuratezza dei risultati.

**La differente scala a cui operano tali strumenti e le professionalità a cui sono rivolti, spesso estranee al mondo della progettazione, costituisce il limite principale per una valutazione integrata del comportamento del costruito a scala urbana e di quartiere.**

**Il presente studio indaga le relazioni tra morfologia urbana, isola di calore e domanda energetica nel contesto climatico e morfologico dell'area Mediterranea, con l'obiettivo di individuare metodologie e parametri di analisi che permettano una valutazione affidabile e speditiva delle prestazioni climatiche ed energetiche della città esistente.**

Nello specifico, mediante analisi sperimentali e modellazioni, sono stati identificati degli strumenti di analisi e valutazione comparativa del comportamento dei tessuti urbani esistenti rispetto al fenomeno dell'isola di calore e alla domanda energetica annuale dell'edificato.

**I parametri e le prestazioni individuate sono incentrate sulla scala locale dei tessuti edilizi, ritenuta la più adeguata ad identificare le relazioni dirette e indirette tra la morfologia e la densità dell'edificato e le implicazioni energetiche e climatiche tra l'interno e l'esterno dell'edificio.**

Ad oggi non esiste infatti una parametrizzazione della morfologia urbana che permetta di valutare, in maniera sintetica e speditiva, il complesso delle interrelazioni energetiche che si stabiliscono nel tessuto urbano e che alterano considerevolmente i risultati **per la domanda energetica a scala di edificio**. La conformazione del tessuto edilizio costituisce inoltre l'elemento meno suscettibile di variazione a fronte dei processi di trasformazione, adeguamento e riuso della città esistente e determina delle "condizioni al contorno" che non è possibile omettere o trascurare nelle valutazioni energetiche.

**E' questo pertanto il campo in cui si è scelto di operare, con l'obiettivo di individuare un sistema di modellazione della morfologia urbana che consenta una valutazione rapida e sufficientemente accurata delle comportamento energetico e climatico dei tessuti nel contesto climatico Mediterraneo.**

**L'intuizione e l'ipotesi alla base del presente lavoro di ricerca è che la morfologia del tessuto urbano giochi un ruolo duplice nel comportamento energetico di interi brani di città, che è stato esplicitato in due contributi principali: un contributo diretto legato alla parziale ostruzione della radiazione solare incidente ed uno indiretto, legato alla modificazione del clima locale per l'effetto dell'isola di calore.**

Omettere o sottovalutare tali contributi comporta un errore considerevole nella stima della domanda energetica dell'edificato, in particolar modo nel clima mediterraneo, in cui buona parte del bilancio energetico è governata dagli apporti energetici passivi, sia in inverno che in estate.

**Il lavoro di ricerca costituisce pertanto una base di conoscenze preliminare per l'individuazione degli ambiti di maggiore vulnerabilità all'interno della città e la definizione di**

of the building energy demand, as they modify the solar access of the buildings and the urban temperatures, causing the heat island effect.

**This reveals a contradiction: although the dense and compact city is more efficient in the resources exploitation if compared to a disperse configuration, at the same time the density of impervious surfaces and the concentration of anthropogenic heat entail a profound alteration of the urban energy balance compared to rural or poorly urbanized areas.**

The various studies on urban climate modeling are thus an important reference for the energy and the environmental impact assessment of the urban areas. **The major limit to their use is that they are suitable for simulation and applications at urban or regional scale. This scale of analysis is too wide with respect to the field of building design and require multiple input data that limit their usability in the building sector.**

But at the same time, the detailed building energy simulation models use standard meteorological databases obtained from weather stations located in open areas and outside the city (airports). Therefore, the air temperature measurements might not include the urban heat island effect and this jeopardizes the reliability and the accuracy of the results.

**So the available tools on urban climate and energy performance operate at different scales and are targeted to different disciplines. Actually these are the main limits for an integrated assessment of the buildings' energy behavior at urban or neighborhood scale.**

The present study investigates the relationship between urban morphology, heat island and energy demand in the Mediterranean context, with the goal of identifying suitable methodologies and parameters for a reliable but rapid assessment of the climatic and energy performances of the existing city.

The output of the thesis are analysis tools for the comparative evaluation of the urban textures' behavior with respect to the urban heat island effect and the buildings' annual energy demand, based on experimental analysis and numerical simulations.

The density parameters and the indices of performances are focused on the local scale of the urban textures, that is considered the most adequate to identify the direct and indirect relationships between the urban morphology and the building behavior, taking into account the dynamic exchanges between indoor and outdoor.

**The research work identifies a parametrization system for the urban morphology useful to assess the energy interrelations that establish at the local scale and that substantially modify the energy needs at building scale.**

After all, the urban texture's structure and morphology are the most resilient elements in the face of the processes of transformation, adaptation and re-use of the existing city. It means that urban morphology determines certain "boundary conditions" that affect the building energy performance for very long time and that cannot be omitted or neglected.

**This is the field in which we chose to operate, with the aim of identifying a modeling system of the urban morphology to enable rapid and sufficiently accurate assessments of the climatic and energy performances of the urban textures in Mediterranean climate.**

The work relies on the assumption that the urban morphology affects the buildings' energy performance at urban scale by means of both direct and indirect contributions: from one hand it contributes to urban warming by enhancing the heat island effect, from the other hand it produces a decrease of the solar radiation reaching the buildings' facades.

**appropriate strategie di riqualificazione edilizia e rigenerazione urbana.**

La struttura metodologica ed i parametri di analisi individuati si configurano come strumenti conoscitivi e di indagine energetica a scala urbana a servizio della progettazione architettonica e della pianificazione.

Il contributo ultimo dello studio è la predisposizione di strumenti speditivi di indagine energetica che consentono ai decisori di individuare in modo oculato in quale settore concentrare gli investimenti e quali strategie di sostenibilità perseguire, ottimizzando **le scarse risorse economiche disponibili e garantendo risultati efficaci su scala urbana.**

**Gli strumenti forniti sono capaci di prefigurare la prestazione energetica di intere aree urbane e permettono di superare la logica della certificazione quale valutazione delle prestazioni dell'intervento realizzato, fornendo ai decisori e a tutti gli attori coinvolti un criterio di scelta delle strategie di sostenibilità da perseguire, sulla base di una prefigurazione *ex ante* dell'efficacia degli interventi e dell'entità effettiva dei risparmi energetici ed ambientali conseguibili su scala urbana.**

Il lavoro di ricerca è articolato in tre sezioni principali.

Nella prima sezione (capitoli 1 e 2) si riporta un excursus del rapporto tra architettura, clima ed energia nel corso della storia, evidenziando i passaggi salienti che hanno portato dall'architettura vernacolare tipica del contesto geografico mediterraneo alla vulnerabilità delle città contemporanea, evidenziando anche lo stato attuale degli strumenti normativi in materia energetica e di adattamento ai cambiamenti climatici. Inoltre si presentano le cause e le conseguenze del fenomeno dell'isola di calore e si discutono gli esiti delle ricerche che hanno affrontato il tema della relazione tra forma e densità dell'edificato, isola di calore e prestazioni energetiche.

Nella seconda sezione (capitoli 3 e 4) si analizza il fenomeno dell'isola di calore nel contesto Mediterraneo, presentando l'esito di analisi sperimentali e modellazioni condotte a Roma e Barcellona, città accomunate da caratteristiche climatiche molto simili, determinate dalla stessa latitudine e dalla vicinanza al mare. In tale contesto viene studiata l'intensità media dell'isola di calore, estiva ed invernale, e la relazione con la morfologia dei tessuti edilizi e le altre variabili implicate nel fenomeno climatico.

Nella terza sezione (capitoli 5 e 6) si presentano le relazioni individuate tra la morfologia dei tessuti urbani e la prestazione climatica ed energetica a scala locale, evidenziando quali parametri di densità risultano più determinanti nella modificazione del comportamento energetico dell'edificato e quali configurazioni morfologiche permettono una riduzione della domanda energetica nel clima mediterraneo.

Infine il capitolo 7 traccia le principali conclusioni del lavoro di ricerca e prefigura ulteriori avanzamenti sulla base dei risultati conseguiti.



The omission of these two contributions may entail relevant errors in the energy assessment at city scale, especially in the Mediterranean climate, where most of the energy balance is determined by passive energy gains, both in winter and summer.

**This study provides a preliminary knowledge basis for the identification of the most vulnerable areas within the city and the definition of appropriate design strategies for buildings' retrofitting and urban regeneration.**

The methodological framework and the parameters identified are meant to be an energy and design analysis tool at urban scale, useful for architectural design and planning services.

The many relationships found between the morphological parameters and the performance at local scale provide the decision-makers with fast and operative analysis tools for the recognition of the climatic and energetic vulnerability in the urban areas and for the choice of the most effective strategies on which focus the investments, ensuring **benefits at urban scale.**

Furthermore, the tools allow an assessment of the energy performance at district scale, **overcoming the limits of the "energy certification" process.**

**The energy certification is an "ex-post" assessment of the building energy performance, while the aim of the developed analysis tools is to provide scientific basis and criteria for the choice of the sustainability strategies to be pursued, based on the forecasting "ex ante" of the achievable savings at urban scale.**

The thesis is composed of three main sections.

The first section (chapters 1 and 2) shows an overview of the relationships between architecture, climate and energy and their development throughout history, highlighting the crucial events that marked the transformation from the vernacular Mediterranean architecture to the climatic and energy vulnerability of the contemporary city. The current status of energy codes and climate change adaptation policies are also discussed.

A deeper analysis is then dedicated to the heat island phenomenon, its causes and consequences and the overall relationships among urban morphology, heat island and energy performance.

The heat island phenomenon in the Mediterranean context is analyzed in the second section (chapters 3 and 4), by means of experimental study and simulations conducted for Rome and Barcelona. The two Mediterranean cities have very similar climatic characteristics, determined by the same latitude and the proximity to the sea.

The average intensity of the heat island is detected for summer season and winter season. The relationships between the heat island intensity and the urban variables involved in the phenomenon are also highlighted, with particular attention to the urban morphology implications.

In the third section (chapters 5 and 6) many relationships are identified between the morphology parameters and the climatic and energy performances of the urban textures. The analytical and graphical relationships point out the most important density parameters with respect to the climatic and energy performances. At the same time, they identify the urban configurations that allow efficient energy performance in Mediterranean context, throughout the year. Finally, in chapter 7 the main findings and conclusions are drawn and further works are outlined, on the basis of the achieved results.

- Beckers, B. (2016). Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction. In A. Ibrahimbegovic (Ed.), (pp. 1–27). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-27996-1\_1
- De Pascali, P. (2008). *Città ed energia: la valenza energetica dell'organizzazione insediativa*. Milano: Franco Angeli,
- European Commission. (2010). *Energy 2020: a strategy for competitive, sustainable and secure energy*. doi:10.2833/78930
- Meadows, D. H., & Club of Rome. (1972). *The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. . New York: Universe Books.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. United Nations, New York*. Retrieved from <http://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf>





# CITTÀ, CLIMA, ENERGIA E SOSTENIBILITÀ

Le città in cui oggi viviamo sono complessi sistemi energivori ed inquinanti, frutto di cambiamenti radicali che a partire dal secolo scorso hanno rivoluzionato le modalità di relazione degli ambienti urbanizzati con il territorio, sulla base di un modello espansivo che perdura ancora oggi nonostante la crisi economica ed ambientale.

Come ben noto, l'avvento della rivoluzione industriale e l'ingresso della società occidentale nell'*Era della macchina* ha innescato un ritmo di crescita esponenziale della popolazione e dei sistemi urbani, nonché della quantità di energia necessaria a garantire livelli di comfort e qualità della vita sempre maggiori per abitanti. Ciò è stato possibile assumendo un presupposto tragicamente sbagliato, ovvero che l'energia (fossile) fosse a disposizione in modo illimitato, che l'incremento dei consumi energetici e del consumo di suolo non comportasse alcuna conseguenza sull'ambiente e che un modello fondato sulla crescita potesse perdurare senza limiti.

*"Il confort ci pone invece di fronte al dilemma dei suoi costi economici, sociali ed ambientali"* (Butera, 2004)

Le drammatiche conseguenze prodotte dal modello della crescita illimitata, divoratore di risorse, inquinante e iniquo sono oggi sempre più tangibili sul territorio, sul clima e sulla società. La crisi, economica ed ambientale, minaccia il livello di benessere della società occidentale, che non è più disposta a rinunciare all'alto livello di qualità della vita a cui è abituata. Ma come possiamo dimenticare il costo sociale che questo modello di sviluppo ha determinato, e continua a determinare, sui paesi più poveri? In quelle parti del mondo in cui ogni comfort è ancora negato si sta anche pagando il prezzo più alto delle conseguenze ambientali e climatiche prodotte dall'azione dell'uomo per soddisfare le esigenze di comfort della società occidentale.

L'inesorabile crescita del potere attrattivo dei territori urbani pone la questione della *sostenibilità urbana* con particolare urgenza.

*"La città è al tempo stesso un concentratore, un convertitore e un dissipatore di energie, dallo scarsissimo rendimento energetico"* (De Pascali, 2008) che, nonostante la sua "inefficienza", rappresenta ancora l'habitat prescelto dalla maggioranza della popolazione mondiale.

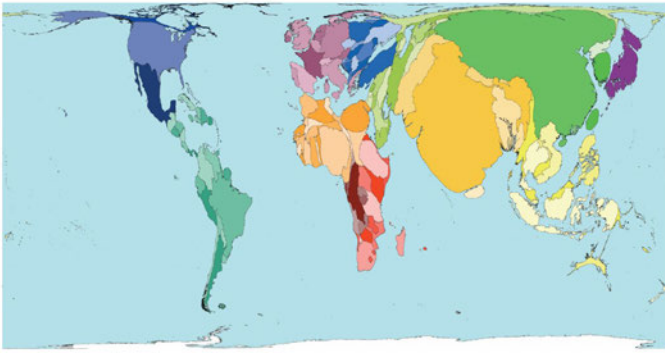
Le implicazioni energetiche ed ambientali legate al settore edilizio non possono essere trascurate e impongono un impegno nuovo delle discipline inerenti alla progettazione architettonica e urbana verso la prefigurazione e la transizione a modelli urbani più eco-compatibili e sostenibili.

*"Una crisi complessa e ormai di lunga durata contraddistingue dalla fine del secolo breve la transizione alla postmodernità e non ha tralasciato di investire alcuna delle attività dell'uomo moderno, e soprattutto si è accanita a segnare con i caratteri della contraddittorietà, dell'incertezza e dell'inaffidabilità quel complesso di scelte, strumenti e fenomeni che hanno configurato il territorio dell'architettura"* (Cecere et al. 2012)

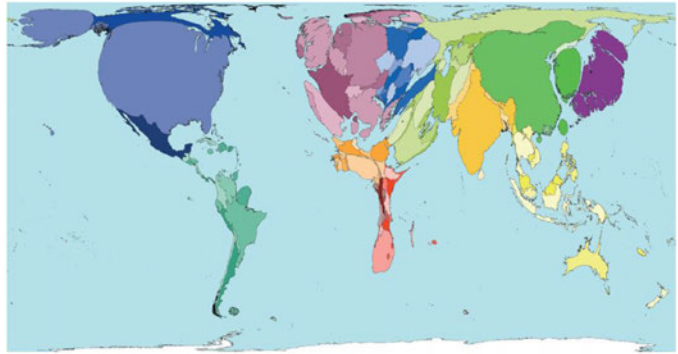
La progettazione urbana e architettonica ha affrontato il problema urbano e ambientale sviluppando conoscenze in materia di *recupero* e *riuso* dell'esistente, sperimentando le pratiche della densificazione e del "costruire sul costruito". Più recentemente il recupero dell'esistente si è arricchito del contributo della riqualificazione energetica, finalizzata ad un incremento complessivo del benessere indoor e della qualità della vita dei cittadini.

Tale approccio, supportato dagli indirizzi e dalle direttive dell'Unione Europea, risponde anco-

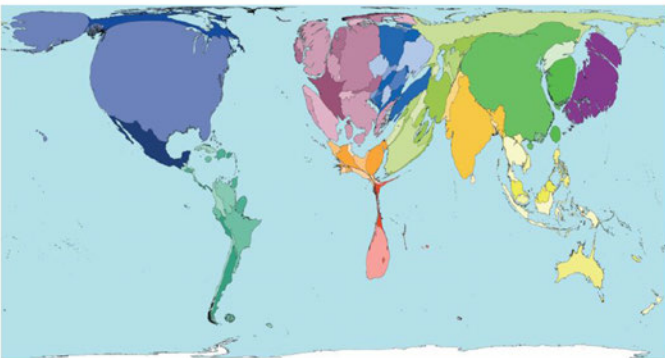
Total Population



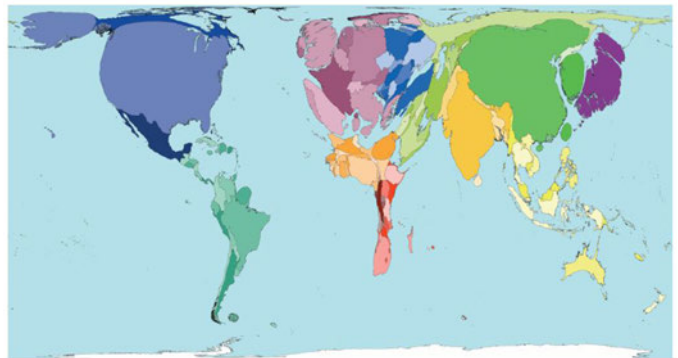
Fuel Use



Carbon Emissions 2000



Ecological Footprint



**Figura 2** Dimensione dei territori in proporzione rispettivamente alla popolazione presente, al consumo di carburante, alla quantità di emissioni e all'impronta ecologica prodotta. Fonte: [www.wordmapper.com](http://www.wordmapper.com), elaborazione del 2006 - SASI Group (University of Sheffield) and Mark Newman (University of Michigan)

ra ad una logica *sviluppista* e non interviene nei meccanismi di crescita dei consumi urbani. Come conseguenza, nonostante la "sostenibilità" sia oggi posta come condizione imprescindibile per l'esistenza di un qualsiasi prodotto o processo, gli strumenti normativi e le prassi progettuali si dimostrano ancora ampiamente inadeguate a garantire risultati apprezzabili sulla riduzione dei consumi e della domanda a scala urbana.

Se è la città ad essere "il problema", la soluzione va ricercata all'interno delle sue dinamiche, sociali, energetiche, politiche ed ambientali, nella consapevolezza della molteplicità e complessità delle interrelazioni esistenti tra tali aspetti.

La necessità di promuovere strategie di abbassamento della domanda energetica a scala urbana impone il confronto contemporaneo con molteplici scale di intervento (dall'edificio, all'isolato, ai tessuti alla città) e con nuove discipline (la climatologia, la meteorologia, la fisica, la fluidodinamica etc.), al fine di poter attuare strategie capaci di un'effettiva incisività sulle dinamiche e sulle *performance* degli ambienti antropizzati. (Cecere et al., 2012).

Il presente capitolo ripercorre le principali tappe che hanno portato alla questione energetica odierna, evidenziando come le problematiche dello sviluppo dei sistemi urbani e l'incremento dei consumi si strettamente connesso all'evoluzione storica del rapporto tra architettura, clima ed energia. La vulnerabilità climatica ed energetica dei sistemi urbani viene analizzata presentando le soluzioni e le strategie di intervento finora proposte e le criticità non ancora risolte. Un riferimento alle teorie a sostegno di modelli urbani alternativi in funzione della loro "sostenibilità" intende evidenziare come nella dicotomia tra città compatta e *sprawl*, la relazione tra la morfologia e densità dell'insediamento ed i consumi energetici ad esso associati sia ancora raramente affrontato con rigore scientifico. Infine si inquadra, nel campo della problematica generale della sostenibilità dei sistemi urbani, il ruolo dei pianificatori e dei progettisti, lo stato attuale degli strumenti normativi in materia di risparmio energetico e adattamento ai cambiamenti climatici ed i risultati sinora conseguiti, evidenziando quali siano le strade auspicabili da percorrere per rispondere agli interrogativi ancora aperti.

## 1.1 Dal clima che “plasma” la città, alla città che modifica il clima

*“It is a recognized fact that the forces of nature have a direct effect on the formation of objects. [...] As sometimes in physics, the knowledge of forms leads to the interpretation of forces that molded it, at other times the knowledge of the forces at work guides a better insight into the form itself.”<sup>1</sup> (Olgyay, 1963).*

Con queste parole Victor Olgyay, pioniere degli studi sull'architettura e l'urbanistica bioclimatica, introduce il tema della relazione tra morfologia urbana e clima nel famoso libro *“Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism”* (Olgyay, 1963). Adottando un parallelismo con la Fisica, per cui la conoscenza della forma conduce all'interpretazione delle forze che la hanno plasmata, anche nello studio della forma urbana e della morfologia dell'edificato è possibile individuare l'influenza delle “forze” che la hanno generata.

Tra queste, il clima rappresenta un elemento che ha condizionato profondamente la maniera di costruire nel corso della storia, esercitando un effetto diretto sulla conformazione dell'insediamento nei differenti contesti geografici. La forma dei tetti, la disposizione delle bucatore in facciata, la proporzione delle strade e degli spazi pubblici, la localizzazione degli insediamenti riflettono, infatti, tanto la cultura e le tecniche proprie di ciascun luogo quanto l'adattamento alle condizioni geografiche e climatiche locali.

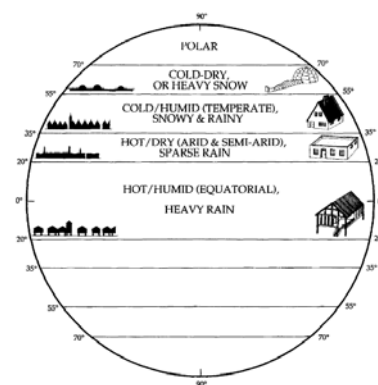
Analizzando la struttura degli insediamenti storici e le caratteristiche costruttive e tipologiche del costruito non vi è dubbio che possa essere individuata una relazione tra tipologia edilizia, morfologia urbana e clima. Caratteristiche costruttive e morfologiche paragonabili possono infatti essere riscontrate in zone del mondo anche molto differenti per cultura e storia, ma che condividono lo stesso clima (Beckers, 2012; Coch & Serra, 1995; Givoni, 1998; Golany, 1996; Olgyay, 1963).

La relazione tra forma e clima, è inoltre riscontrabile tanto alla scala dell'edificio che alla scala urbana.

La struttura della città antica, infatti, non è il risultato della giustapposizione casuale degli edifici, bensì riflette una regola di conformazione a scala maggiore, con aggregati urbani tanto più densi e compatti in relazione a condizioni climatiche benefiche o meno (Cornoldi & Los, 1982; Givoni, 1998; Higuera, 2006; Olgyay, 1963).

Con ciò, non si vuole affermare che nel passato la costruzione della città fosse intenzionalmente realizzata con un controllo rigido della forma volto all'ottimizzazione del comportamento energetico. Tale tesi appare alquanto improbabile data la molteplicità dei fattori in gioco che contribuiscono a determinare l'impianto e l'evoluzione della città antica, quali esigenze difensive e logistiche, concezioni religiose, caratterizzazioni culturali e artistiche, dinamiche politiche ed economiche, stratificazioni storiche, spesso in assenza di un disegno preordinato per l'organizzazione complessiva dell'insediamento.

Ma la capacità di controllare il clima dell'ambiente urbano e all'interno dell'edificio, trasformandolo localmente in maniera positiva utilizzando unicamente le risorse rinnovabili localmente disponibili, è sempre stata una delle prerogative principali delle soluzioni urbane storiche (Rogora, 2013). In un periodo in cui le risorse energetiche erano scarse e preziose, l'unico modo per garantire livelli di comfort accettabili durante tutto l'anno era l'impiego di tipologie edilizie e costruttive che fossero “efficienti” da un punto di vista energetico. L'edificio e la città rappresentavano l'unica protezione alle avversità climatiche esterne e permettevano di modificare gli apporti energetici naturali, quali luce, calore e ventilazione in modo da costituire un “clima



**Figura 3** Forma dei tetti e tipologie costruttive in funzione del clima di riferimento, Golany, 1996

<sup>1</sup> Traduzione: “E’ riconosciuto che le forze della natura hanno un effetto diretto sulla formazione degli oggetti [...]. Come a volte in Fisica, la conoscenza della forma conduce all'interpretazione delle forze che la hanno plasmata, altre volte la conoscenza delle forze in gioco aiuta ad interpretare meglio la forma stessa.” *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*, 1963, PRINCETON UNIVERSITY PRESS, P.84





**Figura 4** Ostuni, Casares e Marrakesh: esempi di insediamenti compatti in clima caldo

interno" più favorevole, in assenza di fonti energetiche alternative.

Nell'area del Mediterraneo, ad esempio, è possibile individuare elementi urbani ricorrenti che funzionano come veri e propri "presidi bioclimatici", atti a garantire un controllo passivo del microclima interno.

Il clima Mediterraneo è caratterizzato da un'elevata variabilità stagionale, con estati calde e secche ed inverni moderatamente freddi. La radiazione solare estiva a queste latitudini è particolarmente rilevante e ciò ha certamente favorito l'impiego di soluzioni costruttive e tipologiche atte a garantire un buon livello di comfort estivo, sia degli spazi pubblici che all'interno degli edifici. In quasi tutti i paesi del nord del Mediterraneo si predilige la pietra locale come materiale da costruzione, usata per realizzare strutture portanti massicce. L'inerzia termica di una parete spessa in pietra consente infatti di immagazzinare il calore durante le ore diurne e mantenere freschi gli ambienti interni, per poi rilasciarlo durante la notte. In estate tale effetto è indubbiamente favorevole, in quanto consente un ritardo della trasmissione del calore verso l'interno durante le ore più calde della giornata; in inverno risulta ugualmente efficiente in quanto permette di mitigare le rigide temperature notturne. Inoltre la presenza di camini di ventilazione, la colorazione chiara delle superfici esterne e la scarsa presenza di bucatore in facciata consente il controllo della radiazione solare e della ventilazione per garantire una ulteriore difesa dalle alte temperature estive

A scala urbana e di tessuto, gli insediamenti in quest'area geografica si caratterizzano per un impianto denso e compatto, che permette una protezione reciproca, degli edifici e dello spazio pubblico, dalla radiazione solare estiva e dai venti invernali. Nel Mediterraneo la convivialità e la possibilità di svolgere attività negli spazi intermedi o in quelli esterni hanno permesso di sviluppare modelli di controllo energetico a livello urbano che permettono sia un miglioramento del microclima degli spazi esterni, ma indirettamente anche un incremento del comfort all'interno degli edifici (Rogora, 2013).

In tale contesto si riconosce, pertanto, una vera e propria cultura dell'adattarsi alle condizioni ambientali locali, tramandata per secoli e che si traduce in una specifica espressione architet-

tonica (Cardinale et al. 2001), seppur non razionalmente pianificata.

Anche in altre regioni climatiche è possibile individuare relazioni strette tra il clima e l'architettura tradizionale (Coch & Serra, 1995; Givoni, 1994, 1998; Golany, 1996). In epoche in cui la disponibilità di energia per la climatizzazione degli ambienti era scarsa o nulla, l'architettura e la morfologia urbana agivano come unico filtro rispetto alle condizioni esterne, determinando delle condizioni artificiali che rispondessero alle esigenze di comfort dell'uomo.

*"Los edificios son barreras a la lluvia, al viento y, a veces, filtros sutiles a la luz y al calor. Rodeados de entornos variables, donde cambian el día y la noche, el calor y el frío, el viento y la calma, la lluvia y el sol; se convierten en refugios de artificiales condiciones, como islas de tranquilidad en un mundo incómodo"* (Serra, 1999)

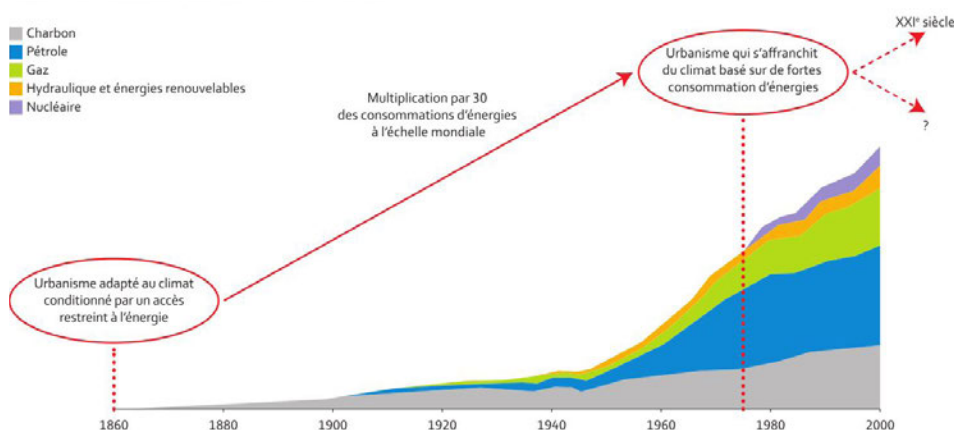
La ricerca di condizioni di comfort sempre più elevate e, soprattutto, l'introduzione di nuove fonti energetiche ha profondamente influenzato la storia dello sviluppo urbano e l'evoluzione dell'architettura.

Oggi possiamo beneficiare di un livello di comfort ben più alto rispetto al passato grazie a sistemi di controllo ambientale che ci permettono di ottenere il clima che vogliamo, quando lo vogliamo, indipendentemente dalle condizioni esterne. Sistemi di riscaldamento, climatizzazione, ventilazione meccanica e controllo domotico hanno completamente affrancato l'architettura dai vincoli climatici.

Ma nel passaggio *"dalla caverna alla casa ecologica"* (Butera, 2004) le esigenze di comfort ed i consumi di energia associati alla città sono profondamente mutati, così come il rapporto tra architettura e clima. Basti pensare che nonostante le condizioni climatiche favorevoli durante buona parte dell'anno, nel contesto Mediterraneo siamo ormai sempre più abituati ad avere uffici, negozi, servizi, trasporti e anche buona parte delle abitazioni totalmente climatizzate, in quanto l'architettura ha completamente perso il ruolo di filtro bioclimatico che aveva nel passato.

Una chiave di lettura interessante dell'evoluzione del rapporto tra architettura e clima e dello sviluppo dell'insediamento urbano attraverso le epoche storiche è senza dubbio l'effetto prodotto dall'introduzione di nuove fonti energetiche nella maniera di concepire e progettare la città (De Pascali, 2008, Apur, 2012, Higuera, 2006). Ogni epoca è in qualche modo caratterizzata da un sistema energetico ed a questo corrisponde una organizzazione insediativa, o viceversa. Il declino di uno dei due, o di tutti e due, avvia il cambiamento, più o meno lungo, più o meno traumatico, verso nuovi sistemi più evoluti che superano i vincoli, o alcuni dei vincoli, posti dai vecchi (De Pascali, 2008).

L'introduzione di nuove fonti energetiche ed il grado di accessibilità dell'energia ha sempre determinato cambiamenti radicali sulle modalità di crescita delle aree urbane e sulla loro conformazione. A tali trasformazioni corrisponde generalmente anche un rapido incremento del livello di qualità della vita degli abitanti, a cui però è associato, inevitabilmente, un incremento dei consumi energetici a scala globale.



**Figura 5** Urbanizzazione e consumo di energia dal 1860 ad oggi, APUR 2012

Disponibilità di energia, stile di vita, consumi e sistema insediativo sono pertanto strettamente legati. Le loro interrelazioni permettono di comprendere le dinamiche che hanno portato alla questione energetica e ambientale delle realtà urbane e metropolitane contemporanee. Una veloce rassegna delle modalità di evoluzione del sistema insediativo in funzione dell'energia appare pertanto utile per collocare l'epoca attuale rispetto a questo punto di vista.

Prima dell'avvento della rivoluzione industriale, gli insediamenti umani e la loro costruzione erano strettamente legati all'ambiente e all'utilizzo sapiente delle risorse naturali del contesto di appartenenza (Butera, 2004; Knowles, 1974; Sertorio, 2002)

Il clima (sole, vento), le risorse materiali locali (legno e acqua) ed energetiche (trazione animale, forza umana) hanno determinato e conformato le tecniche costruttive, le tipologie edilizie e lo stile di vita dell'uomo dagli insediamenti primitivi fino all'alba della rivoluzione industriale senza radicali cambiamenti. L'uso esclusivo della forza muscolare umana e animale per il trasporto e gli spostamenti, ha costituito un vincolo non indifferente sulle distanze percorribili, sui pesi trasportabili e sui tempi necessari al compimento di ciascun processo, imponendo restrizioni forti alle possibilità di localizzazione dell'insediamento, alla sua estensione e alle tipologie edilizie e costruttive realizzabili.

La rivoluzione industriale segna, evidentemente, un punto di svolta cruciale rispetto alla storia precedente, avviando cambiamenti tecnologici, sociali ed economici di epocale importanza, che hanno profondamente mutato la maniera di concepire, costruire e vivere la città. L'introduzione del carbone quale nuova fonte energetica ha fatto sì che nella città industriale si creassero le condizioni per superare i vincoli che nell'epoca precedente avevano condizionato lo sviluppo urbano, aprendo rapidamente la strada ad un nuovo modello di espansione territoriale.

In un arco temporale relativamente breve rispetto alla storia dell'umanità, il processo di industrializzazione ha prodotto un aumento impressionante dei consumi a livello globale, concentrando nel nuovo modello urbano gli impieghi energetici connessi alla produzione industriale, ai servizi, all'aumento della popolazione urbana, al sistema dei trasporti e, non in ultimo, al progressivo innalzamento del tenore di vita dei cittadini.

La nascita della città industriale segna pertanto l'avvio di una seconda fase di sviluppo dei sistemi insediativi, profondamente differente rispetto alla precedente, che vede una progressiva "denaturalizzazione" delle città, raggiungendo il suo compimento negli anni 30.

La massiccia migrazione della popolazione dalla campagna alla città determina condizioni di emergenza abitativa e sanitaria che mutano profondamente i processi e le tecniche di costruzione e le modalità di organizzazione dei sistemi urbani. Il Movimento Moderno internazionale e l'urbanistica razionalista rappresentano l'apice e la teorizzazione del nuovo modello di sviluppo, in cui l'architettura perde progressivamente i legami con il contesto naturale, per rispondere ad esigenze di economicità, funzionalità e rapidità di realizzazione.

In questo contesto, un ulteriore passaggio fondamentale è costituito dalla distribuzione a rete dell'elettricità. La disponibilità di energia elettrica, senza vincoli di tempo e di uso ha permesso la definitiva rottura del nesso localizzativo tra insediamento urbano e luogo di produzione, in virtù della possibilità di distribuzione a distanza, consentendo il soddisfacimento di nuovi servizi per la vita quotidiana della città (De Pascali, 2008).

Inoltre l'avvento dell'elettricità costituisce una rivoluzione radicale nella modalità di concepire e progettare gli edifici e la città. La diffusione dell'ascensore e dei sistemi di ventilazione meccanica ha consentito un rapido sviluppo verticale dell'edificato. I numerosi studi sulla tipologia a torre costituiscono una novità per l'architettura dell'epoca, che consentiva al contempo di soddisfare i requisiti di densità necessari a fronte della crescita della popolazione urbana, liberando lo spazio urbano per risolvere il problema della congestione del traffico. Si afferma così la tipologia del grattacielo e la nascita di paesaggi urbani "verticali" che oggi costituiscono l'immaginario collettivo della città per antonomasia.





**Figura 6** Sperimentazioni sulla tipologia del grattacielo. In alto progetti per il concorso del *Chicago Tribune*, di Elieel Saarinen, Walter Gropius e Adolf Loos. In basso la *Ville Radieuse* e *Plan Voisin* per Parigi di Le Corbusier

Allo stesso modo l'avvento dell'era del petrolio, che conosce la sua massima espansione con la diffusione della motorizzazione privata dal secondo dopoguerra, produce una modificazione profonda dell'organizzazione urbana. La città si estende e si disperde in orizzontale, con il proliferare di sobborghi periferici che, nel corso degli anni, hanno dato vita al fenomeno della "dispersione abitativa" (o *sprawl* urbano), oggi oggetto di profonda critica per i costi ambientali che ne sono derivati.

Le "rivoluzioni energetiche" hanno pertanto profondamente mutato i caratteri dell'architettura tradizionale e la morfologia dell'insediamento urbano. La disponibilità di energia "teoricamente illimitata" ha progressivamente allontanato le tecniche costruttive e la pratica della progettazione architettonica e della pianificazione dalle caratteristiche locali del contesto, conducendo a processi di omologazione degli esiti formali in ogni parte del mondo.

In particolare, a partire dall'era della città industriale e fino ai giorni d'oggi, la disponibilità di energia a basso costo, l'industrializzazione del processo edilizio e lo straordinario aumento della popolazione urbana, hanno completamente affrancato il progetto architettonico dai vincoli climatici del contesto geografico di appartenenza, delegando la funzione di controllo del microclima ai sistemi di climatizzazione e riscaldamento.

Ciò ha inevitabilmente determinato un incremento esponenziale dei consumi energetici legati al settore civile, in quanto i sistemi impiantistici, seppur tecnologicamente evoluti ed efficienti, necessitano di approvvigionamenti energetici sempre più onerosi per poter garantire i livelli di comfort cui siamo ormai abituati. Il divario tra l'impiego di energie da fonti fossili ed energie passive o da fonte rinnovabile a partire dagli anni '60 è diventato sempre più grande (Fernández, 2014), in parallelo ad una crescita costante della popolazione urbana e del consumo di suolo.

L'inarrestabile incremento attuale dei consumi energetici in ambito urbano è determinato anche da un progressivo processo di "terziarizzazione" che caratterizza la città post-industriale e contemporanea (Burdett & Sudjic, 2007), e dal lascito di politiche precedenti, quali l'incentivazione del sistema di trasporto basato su gomma che ha prodotto un'estensione indiscriminata

dell'edificato sul territorio.

Le trasformazioni avvenute nel XX secolo hanno fatto sì che nel passaggio dal modello urbano pre-industriale a quello moderno il consumo di energia a scala mondiale è aumentato di 30 volte (Apur, 2012), dovuto alla concomitanza di un aumento esponenziale della popolazione urbana e dell'energia associata al funzionamento del sistema.

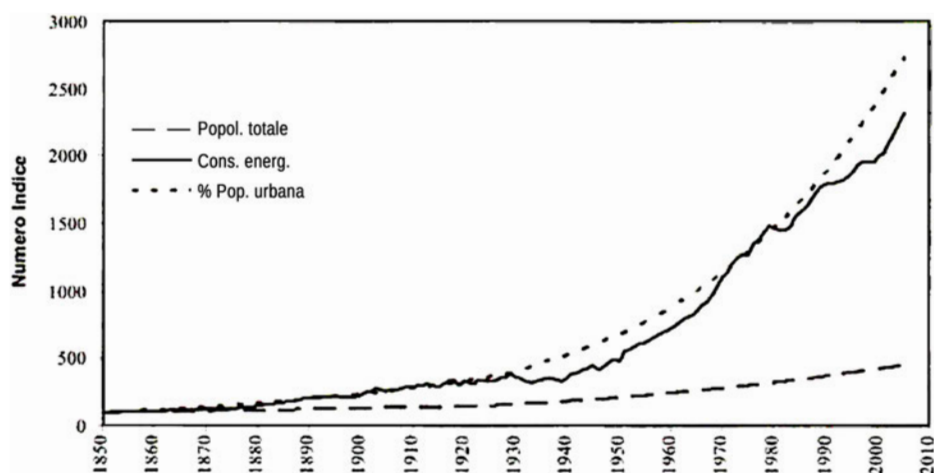
Analizzando la curva dei consumi energetici in parallelo a quella della crescita della popolazione urbana (figura 7), si nota un periodo di stasi e diminuzione dei consumi solo negli anni 30-40. A partire dal secondo dopoguerra, il boom economico che interessa gran parte del mondo occidentale determina un incremento ancora più rapido dei consumi energetici, che raggiunge un culmine negli anni 70-80, periodo nel quale la popolazione urbana raggiunge i valori massimi nel contesto occidentale e sperimenta i primi effetti dell'insostenibilità dei ritmi di consumo di risorse energetiche e ambientali non rinnovabili.

Ma l'incremento dei consumi urbani, e in particolare di quelli del settore residenziale, non è da imputarsi solo all'innalzamento del tenore di vita degli abitanti e all'incremento della popolazione. La città, che un tempo era costituita di edifici in grado di assicurare un buon comportamento energetico durante tutto l'anno sfruttando gli effetti benefici del clima e proteggendosi dalle avversità mediante l'impiego di materiali e morfologie idonee, si è oggi trasformata in un coagulo di edifici dalle forme più diverse, guidati dalla logica della realizzazione veloce e a basso costo, uniformati dall'estetica del calcestruzzo e del vetro, noncuranti delle conseguenze microclimatiche interne ed esterne.

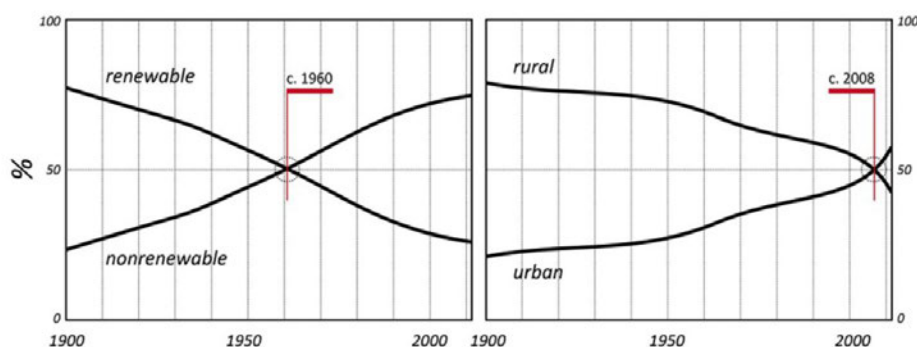
La maggior parte del patrimonio edilizio esistente non è stato progettato in considerazione del clima di riferimento e a volte "funziona peggio del clima stesso" (Coch, 1998). La scarsa attenzione per le prestazioni ambientali dell'architettura ha determinato un aumento delle dispersioni termiche invernali e dei carichi estivi, che contribuisce all'incremento dei consumi energetici per la climatizzazione ed il riscaldamento.

Alla luce di questo quadro generale, non risulta difficile comprendere per quale motivo il consumo energetico a scala urbana sia pericolosamente cresciuto negli ultimi decenni, soprattutto

**Figura 7** Aumento della popolazione urbana e consumi energetici, da De Pascali 2008



**Figura 8** Uso di energie da fonte rinnovabile o non rinnovabile e proporzione tra popolazione urbana e rurale, Fernández J. E. 2014



nella stagione estiva, a causa dell'impiego ormai diffuso dei sistemi di condizionamento, e di quanto tale problema sia rilevante considerando la quantità di popolazione che risiede in città di media e grande dimensione.

La preoccupazione per la questione energetica si concretizza solo negli anni '70, quando la società occidentale prende coscienza della tragica eventualità dell'esaurimento dei combustibili fossili, in conseguenza di una improvvisa e inaspettata interruzione del flusso di approvvigionamento del petrolio a seguito della guerra del Kippur prima (1973) e della rivoluzione iraniana poi (1979).

Da allora, *"il problema energetico si rappresenta tragicamente, come vicinissimo e indifferibile esaurimento dei combustibili fossili con il prevedibile conseguente aumento dei prezzi, progressivo, inesorabile, strangolante"* (De Pascali, 2008). Le crisi degli anni '70 determinano un breve periodo di stallo nella curva di incremento dei consumi energetici. A tutti gli effetti però, nell'arco di pochi anni i consumi tornano a crescere, come e più di prima.

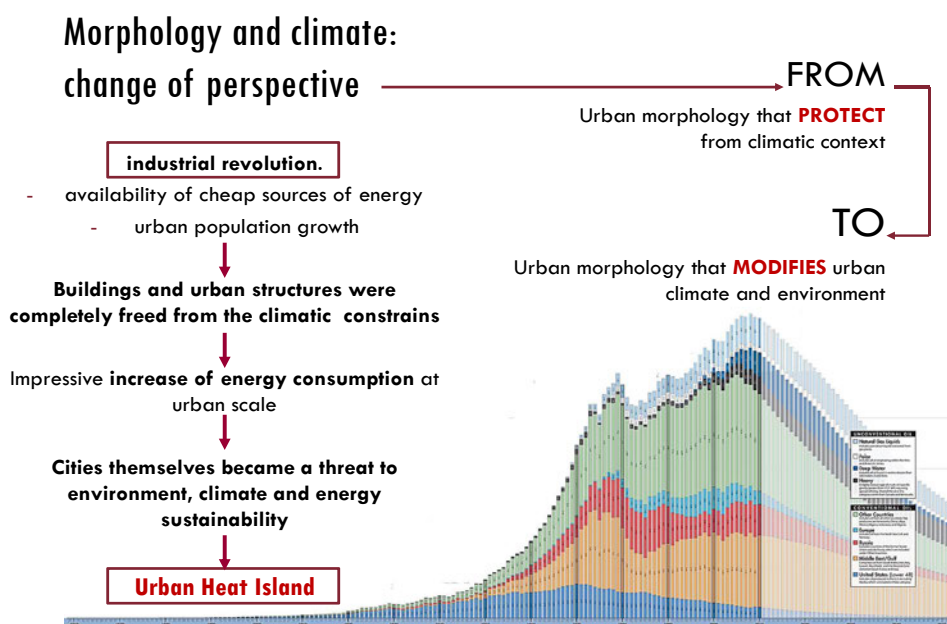
Finora, il processo evolutivo che nel corso della storia ha portato all'introduzione di nuove fonti energetiche e a nuovi stili di vita ha determinato indubbiamente un innalzamento della qualità della vita e l'avanzamento delle conoscenze, ma con costi sociali e ambientali anche molto alti. Quello che oggi si mette in dubbio, a discapito dell'evoluzione storica appena descritta, è che sia possibile trovare "nuove strade energetiche" in grado di soddisfare il livello della domanda attuale senza mettere in discussione il modello espansivo su cui è fondato, per il quale l'ingresso nella fase di crisi è ormai sancito. Il tentativo di rispondere all'insostenibilità dei consumi attuali mediante una maggiore efficienza dei sistemi svela la scelta di perseguire sulla strada dell'espansione e della crescita, nonostante l'evidenza di impatti già tangibile ed irreversibili sull'ambiente e dei conseguenti costi sulla collettività.

Siamo infatti arrivati al paradosso che, se un tempo l'architettura costituiva una difesa ed una protezione per l'uomo rispetto all'ambiente, oggi rappresenta una minaccia all'ambiente ed al clima stesso. L'estensione delle aree urbane, la densità del costruito, l'impermeabilizzazione dei suoli, la produzione di calore antropogenico hanno già cambiato il clima urbano in tutte le aree del globo, determinando il fenomeno dell'isola di calore che risulta particolarmente preoccupante dal punto di vista della salute dei cittadini e dell'incremento dei consumi per la climatizzazione estiva.

In questo contesto, lo studio della relazione tra morfologia urbana e clima torna ad essere di forte interesse, ma in una forma nuova rispetto al passato: dallo studio delle conformazioni urbane che meglio si adattavano e regolavano in maniera benefica il clima locale, allo studio



**Figura 9** Effetti della crisi petrolifera del 1973, Fonte: <http://www.qualenergia.it>



**Figura 10** La nuova relazione tra morfologia urbana e clima - elaborazione personale. Sullo sfondo: produzione di petrolio dal 1850 al 2050, <http://www.oilposter.org/>

delle forme urbane che garantiscono il minor impatto sul clima e sull'ambiente.

Lo studio della relazione tra morfologia urbana, domanda energetica e isola di calore che si presenta con questo lavoro di ricerca risponde a questo interesse ed è pertanto volto all'individuazione di strategie efficaci di riduzione della domanda energetica a scala urbana, che possano consentire una riduzione dell'impatto ambientale della città esistente e futura.



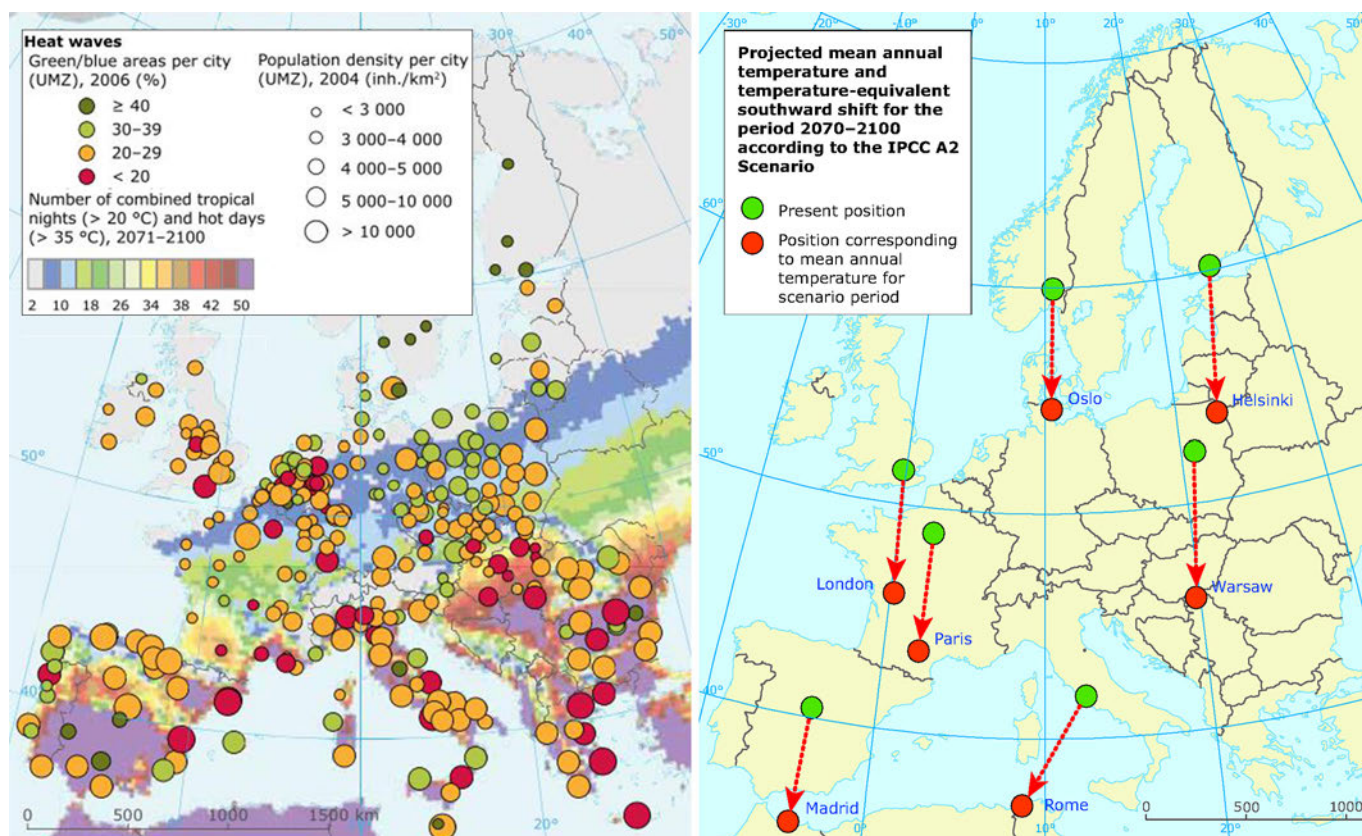
## 1.2 Vulnerabilità dei sistemi urbani ai cambiamenti climatici: mitigazione e adattamento

Il cambio climatico e l'eccessivo consumo energetico da fonte non rinnovabile costituiscono, ad oggi, una minaccia concreta per la sicurezza, la salute ed il benessere della popolazione urbana in tutto il mondo. E' ben noto che l'edilizia costituisce il settore maggiormente responsabile del consumo energetico, con un'incidenza pari al 40% dell'utilizzo globale dell'energia nel mondo occidentale (Pérez-Lombard et al. 2008). Il suo ruolo nella determinazione del livello di rischio e vulnerabilità urbana è pertanto centrale e va adeguatamente affrontato ad opportune scale di analisi, che permettano di comprendere le implicazioni energetiche ed ambientali che si instaurano tra l'edificio ed il contesto urbano.

Tutte le città di media e grande dimensione sono interessate dal fenomeno denominato "Isola di calore urbana", che comporta un aumento delle temperature in ambito urbano rispetto alle contermini aree non urbanizzate.

Tale fenomeno, sia allo stato attuale che in proiezioni future, risulta particolarmente preoccupante, ancor più in considerazione del cambio climatico globale che interessa l'intero pianeta. In particolar modo nell'area Mediterranea e nelle città caratterizzate da alta densità di popolazione e scarsa presenza di vegetazione, l'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA), nel report "Climate change, impacts and vulnerability in Europe" (EEA, 2012), configura uno scenario di incremento delle "notti tropicali" ( $>20^{\circ}\text{C}$ ) e dei "giorni estremamente caldi" ( $>35^{\circ}\text{C}$ ) in conseguenza dell'effetto congiunto dei cambiamenti climatici e dell'intensità di isola di calore nelle maggiori aree urbane. Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (Ministero dell'ambiente, 2014) ha inoltre rilevato un incremento medio della temperatura in

**Figura 11** A sinistra: Fattori che determinano la vulnerabilità alle ondate di calore: densità di popolazione e scarsità di vegetazione. Fonte: EEA,2012. A destra: Apparente spostamento verso sud delle città europee a causa di cambiamenti climatici, proiezione 2070-2100. Fonte: EEA 2009, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/apparent-southward-shift-of-european-cities-2014-due-to-climate-change-2070-2100>





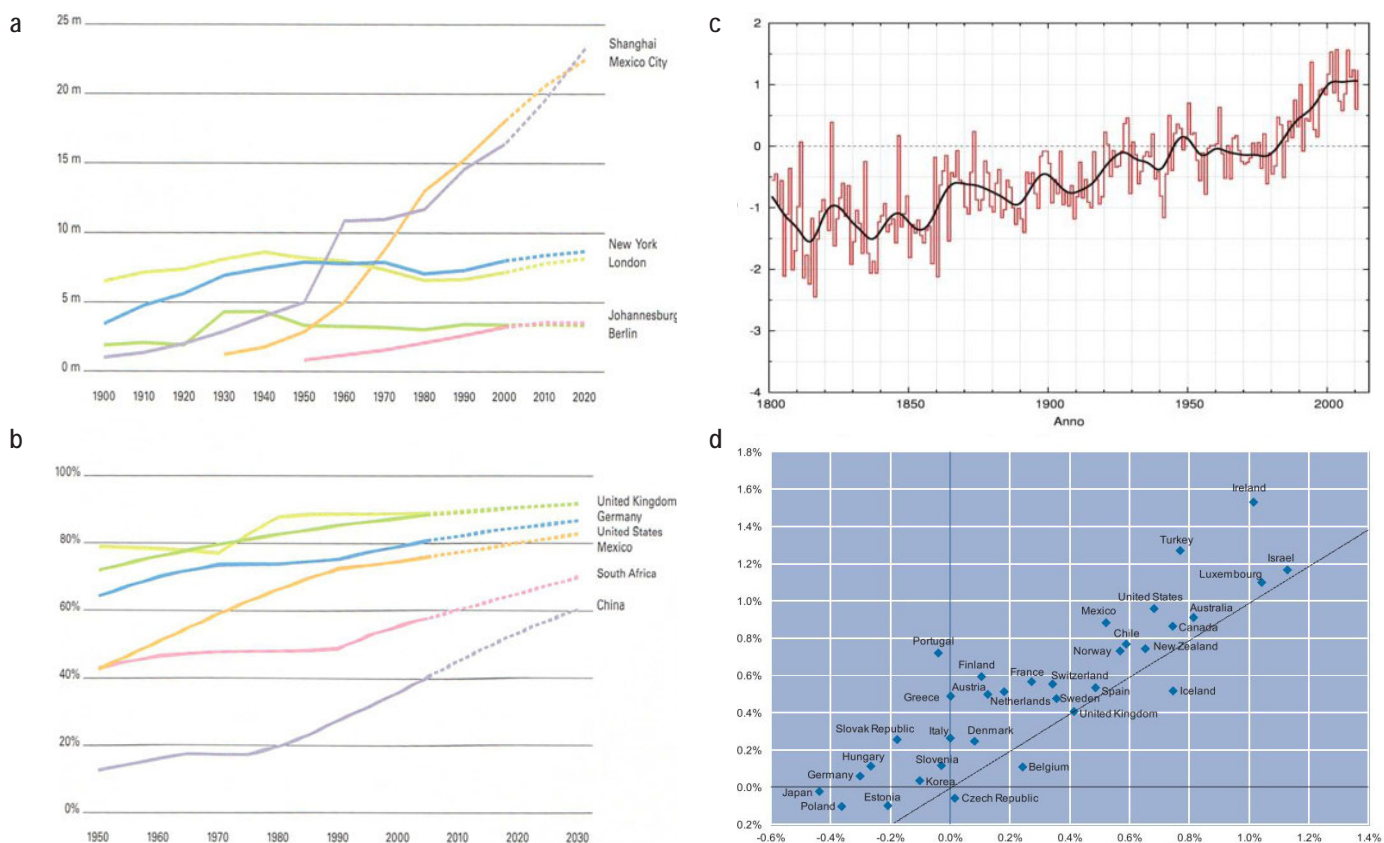
Europa superiore a quello medio globale, con un rateo di crescita sugli ultimi 30 anni quasi quattro volte più grande di quello calcolato sugli ultimi due secoli.

Le onde di calore, sono definite come “*un evento della durata di alcuni giorni in cui la temperatura massima è superiore ad una soglia rappresentata da un percentile elevato della distribuzione delle temperature massime giornaliere sul trentennio climatologico*” (Ministero dell'ambiente, 2014). Tale fenomeno in Italia ha assunto un trend positivo a partire dagli anni '70, ma il 46% degli eventi si è verificato nell'ultimo decennio. Gli episodi più intensi sono tragicamente noti, come l'estate del 2003, che in Europa risulta una delle maggiori catastrofi naturali per numero di morti negli ultimi 100 anni (Conti et al., 2005; UNEP, 2004; Vandentorren et al., 2004).

E' stato già comprovato che le trasformazioni determinate dalla presenza di un'area urbana, in primo luogo l'impermeabilizzazione dei suoli e la densità dell'edificato, provocano cambiamenti tangibili sul clima, sulla qualità dell'aria e sul deflusso delle acque, amplificando l'impatto del cambiamento climatico globale sulla cittadinanza e determinato livelli di rischio e danno consistenti.

L'incremento costante della popolazione urbana, a cui continua a corrispondere anche ulteriore consumo di suolo, contribuisce ad aumentare il livello di vulnerabilità e rischio nelle aree urbane. Sebbene la realtà europea non presenti i ritmi di crescita paragonabili alle metropoli asiatiche, africane o sudamericane, tuttavia anche nel *Vecchio Continente* la popolazione urbana continua lentamente a crescere, ma soprattutto già oggi costituisce la percentuale maggiore della popolazione residente (>60%) (Population Reference Bureau, 2015; United Nations, 2014; World Bank, 2014). Inoltre, per il caso italiano, si rileva un record “negativo” per quanto riguarda il consumo di suolo rispetto alla media europea (Eurostat, 2012), con un valore della copertura artificiale di suolo pari al 7,3% del totale, contro il 4,3 della media Ue23 (ISPRA, 2015; ISTAT, 2012).

**Figura 12** A sinistra: (a) Crescita della popolazione in sei città del progetto *Urban Age - LSE Cities* - e (b) livello relativo di urbanizzazione nei corrispondenti paesi. Fonte: Burdett & Sudjic, 2007. A destra: (c) Incremento della Temperatura media annuale in Italia, Fonte: Ministero dell'Ambiente 2014. (d) Incremento percentuale della popolazione e delle superfici costruite nei paesi OECD, 2000-2050, Fonte: OECD Green Growth Studies 2012



In un contesto già profondamente intaccato dall'azione umana e alla luce di proiezioni future tutt'altro che rassicuranti, lo studio dell'impatto ambientale dei sistemi urbani costituisce una priorità improrogabile. I cambiamenti climatici sono in effetti, dagli ultimi anni a questa parte, al centro dell'attenzione sia scientifica che mediatica, per il crescente impatto dei fenomeni meteorologici estremi in diverse aree del globo, e per l'evidenza empirica dei danni economici, sociali e ambientali provocati. Le aree urbane sono interessate da fenomeni meteorologici spesso imprevedibili la cui crescente intensità e frequenza prefigura scenari sempre più radicali ed irreversibili. Il caso italiano è emblematico da questo punto di vista, perché data l'eterogeneità e l'alto livello di urbanizzazione che caratterizza il territorio, risulta vulnerabile sotto molteplici punti di vista, come purtroppo la cronaca negli anni recenti ci ha testimoniato.

Il nodo cruciale della questione è che i mutamenti climatici globali e locali sono perlopiù causati dal comportamento non virtuoso delle aree urbane, in cui si concentra un'alta percentuale di suolo artificiale a discapito di quello naturale nonché la maggior quota dei consumi e quindi delle emissioni di gas serra. Inoltre, stando alla ricerca Urban Age Project, entro il 2050 il 75% della popolazione mondiale vivrà in città (Burdett & Sudjic, 2007).

Allo stesso tempo, dunque, le città sono causa del cambiamento climatico, ma ne subiscono anche in maniera più rilevante gli effetti; esse rappresentano dunque non solo il problema, ma anche parte della soluzione sulla quale intervenire (Bussadori, 2013).

Gli impatti che i cambiamenti climatici e gli effetti dell'isola di calore possono indurre sugli insediamenti urbani sono molto diversificati e riguardano, con intensità variabili in funzione delle situazioni locali, la salute dei cittadini, il funzionamento di infrastrutture e di reti tecnologiche, gli incrementi improvvisi di domanda energetica, le modifiche delle condizioni di socialità, stress ambientali nelle aree con naturalità residua e nel verde pubblico, carenze negli approvvigionamenti idropotabili, diminuzione della competitività e della redditività di alcune attività economiche, esasperazione di conflitti sociali e politici, drastica diminuzione della qualità di vita delle fasce più svantaggiate di popolazione, incremento dei rischi legati alle inondazioni, alla instabilità dei suoli e agli incendi, allagamenti negli insediamenti costieri (Ministero dell'ambiente, 2014).

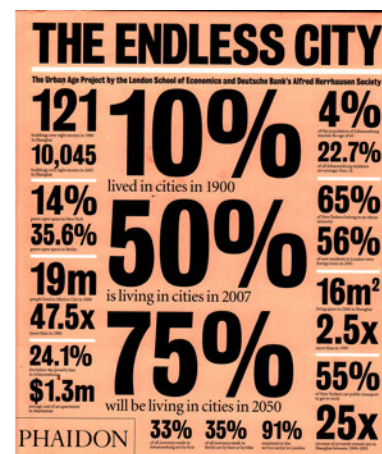
La risposta a impatti di questa dimensione, che in assenza di una inversione di tendenza dei consumi e delle emissioni rischia addirittura di accelerare nel futuro, chiama in causa diversi livelli di governo e competenze tecniche e scientifiche nuove nell'ambito dello studio e della pianificazione urbana.

La questione ambientale e climatica è senza dubbio diventata un nodo fondamentale della pianificazione urbanistica e territoriale, ma ad oggi sono rarissimi i casi in cui la pianificazione abbia considerato un uso consapevole delle risorse naturali ed ambientali come elemento guida delle scelte di piano.

Inoltre senza una conoscenza della distribuzione della vulnerabilità locale, a scale spaziali adeguate all'indagine dei fenomeni energetici e climatici, risulta difficile supportare l'azione della pianificazione e della progettazione in maniera efficace.

Il primo sforzo profuso verso la costruzione di un sapere scientifico e condiviso in materia climatica e ambientale è stata la creazione, nel 1988, dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). L'organismo, costituito da *United Nations Environment Programme* (UNEP) e *World Meteorological Organization* (WMO), nasce con lo scopo di studiare il fenomeno del riscaldamento globale, i suoi impatti sul sistema naturale, economico e sociale e le strategie di mitigazione, vale a dire di riduzione di emissioni climalteranti.

L'evento che invece assume maggior impatto mediatico e politico, e sancisce l'acquisizione da parte dell'opinione pubblica della questione ambientale, è la Conferenza di Rio de Janeiro, o *Summit della Terra*, che nel 1992 riunisce capi di stato e organizzazioni non governative per discutere del tema ambientale. La conferenza porta alla firma della "Convenzione quadro



**Figura 13** *The endless city* (Burdett & Sudjic, 2007), Progetto Urban Age della London school of economics and political science e Deutsche Bank's Alfred Herrhausen Society



**Figura 14** Il riscaldamento globale, rappresentazione di Andy Singer (2005)



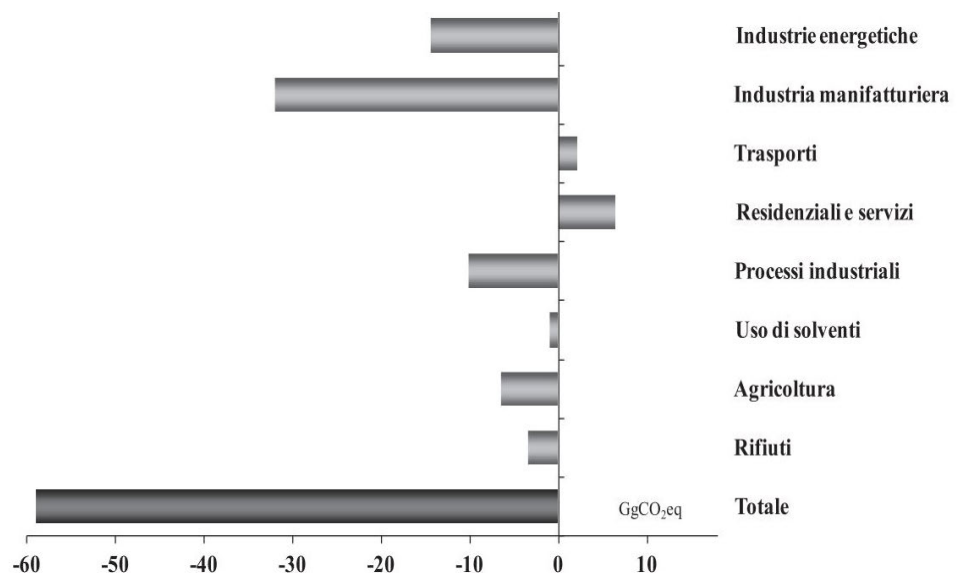
**Figura 15** Smog a Pechino durante la conferenza sul Clima a Parigi (COP21)  
Fonte: <http://www.repubblica.it/ambiente/>

delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici" e alla redazione dell'Agenda 21. *Da questo momento, l'attenzione si sposta sulle criticità ambientali generate dai consumi energetici e dall'impiego di combustibili fossili, considerati responsabili dell'effetto climalterante a scala globale e dell'incremento dell'inquinamento, con conseguenze sul microclima, nel contesto urbano* (De Pascali, 2008).

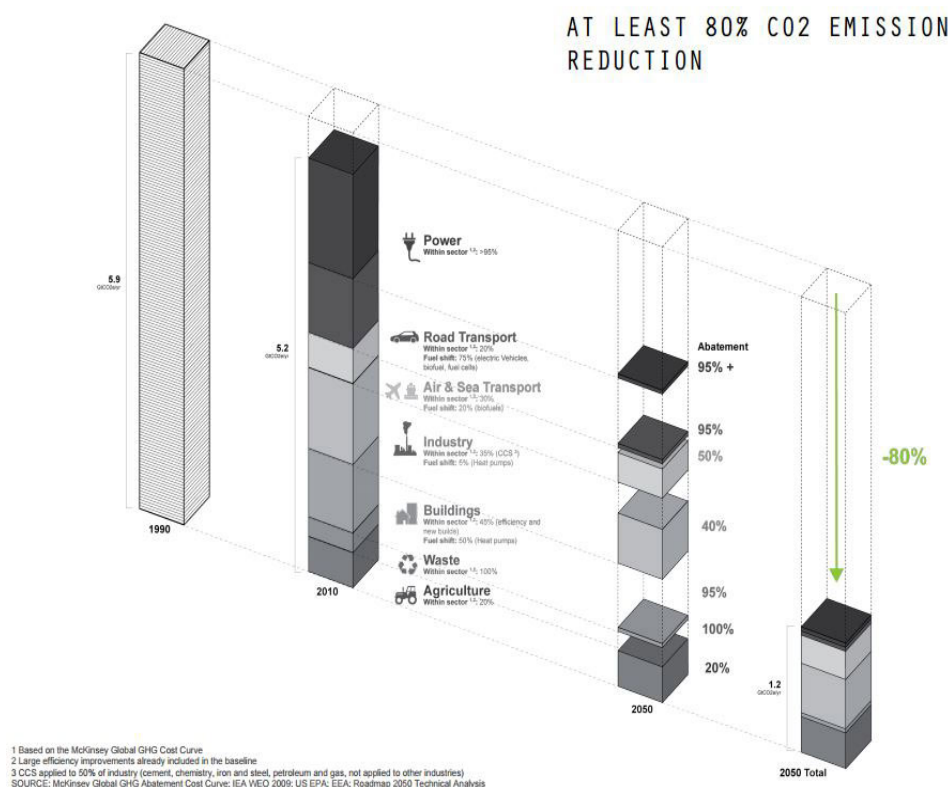
Pertanto, di fronte all'evidenza del cambio climatico globale, e agli effetti diretti e indiretti sull'ecosistema naturale e urbano, la prima reazione è stata la ricerca di una "mitigazione" del fenomeno. Alla conferenza di Rio seguono una serie di incontri, denominati "conferenze delle parti" (COP) che perseguono tale via, con l'obiettivo di raggiungere una stabilizzazione dei contenuti di CO<sub>2</sub> in atmosfera e "bloccare" l'incremento delle temperature. In particolare è la terza conferenza delle parti del 1997 che per la prima volta sancì una riduzione, legalmente determinante, delle emissioni di gas serra da parte dei paesi firmatari del Protocollo di Kyoto. Gli incontri successivi non hanno effettivamente prodotto avanzamenti significativi, per il mancato accordo sul taglio delle emissioni, i tempi e gli investimenti e, soprattutto, l'obbligatorietà alla ratifica da parte di tutti i paesi partecipanti. Molte aspettative erano riposte sull'ultimo incontro a Parigi, il COP-21. L'accordo raggiunto, che entrerà in vigore dal 2020 al decadimento di Kyoto, è stato annunciato come "epocale", perseguendo l'obiettivo ambizioso del contenimento dell'innalzamento delle temperature sotto la soglia critica dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, attraverso l'attuazione di piani nazionali di riduzione delle emissioni che saranno monitorati ogni 5 anni. Tuttavia non possiamo affatto parlare di successo, ma piuttosto di successo mancato, dato che dall'accordo è scomparsa la prospettiva di decarbonizzazione entro il 2050, ovvero l'abbandono totale dei carburanti fossili, così come il vincolo legale di adempimento per i paesi firmatari. Inoltre, qualora anche tutti i Paesi rispettassero i propri impegni, è già noto che l'insieme delle azioni intraprese non sarebbero sufficienti a contenere l'incremento delle temperature entro i 2°C e tanto meno a raggiungere l'obiettivo ideale di 1,5°C.

Non possiamo pertanto affermare che siano state prese decisioni in grado di orientare la società e l'economia verso modelli di maggiore sostenibilità e sobrietà energetica e ambientale. Ancora una volta non si è messo in dubbio il modello di sviluppo autodistruttivo della crescita, puntando su misure mitigative che rappresentano al più una forma di "pacificazione della coscienza", ma non consentiranno di invertire la tendenza del cambio climatico.

A tal proposito è interessante riportare un comunicato dell'ISPRA del 2014, che riferisce sullo stato dell'Italia al 2012, rispetto agli impegni di Kyoto. L'ISPRA annuncia, con sufficiente ottimismo, che il traguardo è vicino: *"In Italia, nel 2012, le emissioni totali di gas serra, espresse in CO<sub>2</sub> equivalente, sono diminuite del 5.4% rispetto all'anno precedente e dell'11.4% rispetto all'anno base (1990). Considerando la media delle emissioni del periodo 2008-2012, la riduzione rispetto all'anno base è di 4.6% a fronte dell'impegno nazionale di riduzione del 6.5%*



**Figura 16** Variazione delle emissioni nel 2012 rispetto al 1990 per settore, Fonte: ISPRA 2012



**Figura 17** RoadMap 2050, Fonte: European Climate Foundation, <http://www.roadmap2050.eu/>

nello stesso periodo” (ISPRA, 2014). Ma se analizziamo la specifica della variazione nei vari settori, vediamo che le emissioni di gas serra del settore trasporti sono aumentate del 2.9% rispetto al 1990, nel settore dell'agricoltura sono diminuite del 16.0%, nella gestione e trattamento dei rifiuti sono diminuite del 17.5%, nell'industria manifatturiera sono diminuite del 36.8% ed infine quelle collegate alle industrie energetiche sono diminuite dell'8.0%, a fronte però di un aumento della produzione di energia termoelettrica da 178.6 Terawattora (TWh) a 217.6 TWh, e dei consumi di energia elettrica da 218.7 TWh a 307.2 TWh. Sempre nello stesso periodo, infatti, le emissioni energetiche dal settore residenziale e dei servizi sono aumentate dell'8.2% rispetto al 1990.

In sostanza pertanto, l'abbassamento dei livelli di emissione è dovuta ad una riduzione dei consumi energetici associati alla produzione industriale, a causa della crisi economica e della delocalizzazione, alla crescita della produzione di energia da fonti rinnovabili (idroelettrico ed eolico) e all'incremento dell'efficienza energetica. Nulla si è fatto per un'effettiva riduzione della domanda energetica in ambito urbano, che al contrario continua ad aumentare.

Di questo passo risulta difficile pensare di adempiere all'ulteriore impegno preso dall'Europa nel 2009, di abbattere le emissioni di gas serra del 20% entro il 2020 rispetto ai valori del 1990 (European Commission, 2010). Ancora più lontano appare invece la prospettiva di una quasi complete de-carbonizzazione dell'Europa, annunciata attraverso una “Roadmap” che dovrebbe portare ad una riduzione, tra l'80 e il 95% delle emissioni nel 2050, rispetto ai livelli del 1990<sup>2</sup>, così come gli impegni recentemente assunti al COP21.

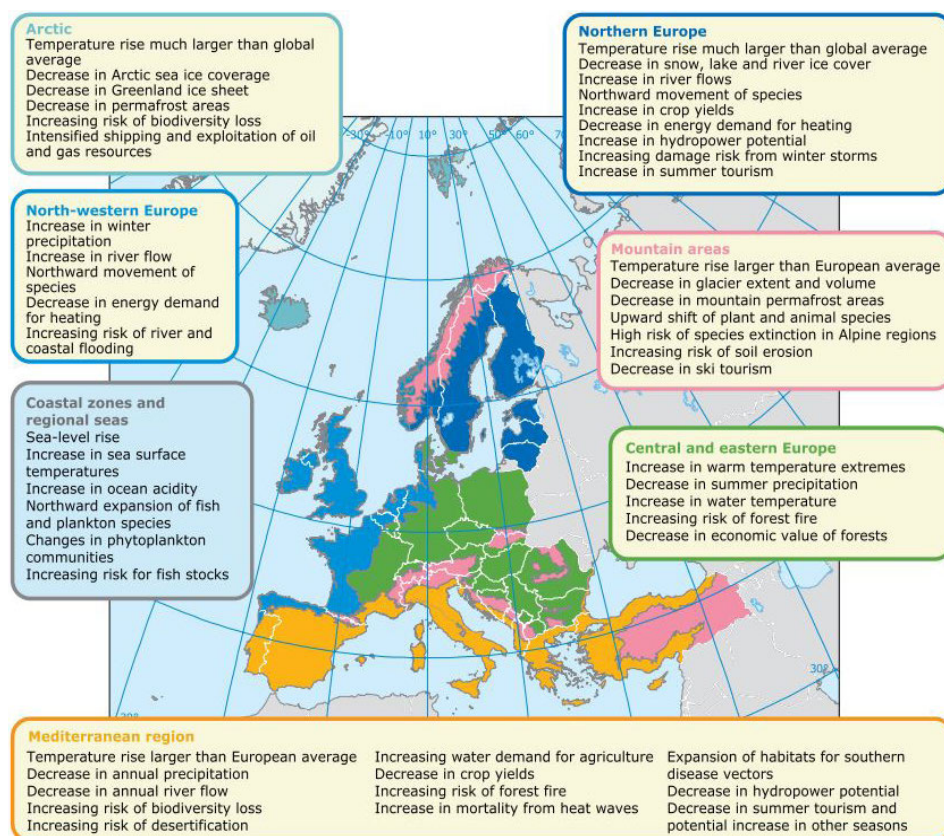
Non solo, quello che oggi si mette in dubbio è l'utilità stessa, o quantomeno l'efficacia delle strategie di mitigazione.

Da un lato i dati disponibili dimostrano che il cambio climatico è già avvenuto a livello globale, con l'aumento della temperatura media della superficie terrestre di 1°C rispetto ai valori pre-industriali<sup>3</sup>; dall'altro, anche se a livello mondiale riuscissimo a limitare e poi a ridurre le

<sup>2</sup> <http://www.roadmap2050.eu/>

<sup>3</sup> <http://www.metoffice.gov.uk/news/release/archive/2015/one-degree>





**Figura 18** Impatti dei cambiamenti climatici, EEA 2012

emissioni di gas serra, ci vorrà del tempo prima che il pianeta riesca a recuperare rispetto ai livelli di gas serra già presenti in atmosfera (Commissione Europea, 2009).

Ciò significa che dovremo affrontare gli impatti dei cambiamenti climatici almeno per i prossimi 50 anni e la strategia più efficace (e conveniente) è l'*adattamento* piuttosto che la mitigazione, o quantomeno entrambe.

*Con "adattamento" si intende un adeguamento del sistema ecologico, sociale o economico in risposta agli stimoli climatici e agli impatti in atto, o prevedibili per il futuro; l'adattamento comporta cambiamenti nei processi, nelle pratiche e nelle strutture, al fine di moderare i potenziali danni o di beneficiare di opportunità associate ai cambiamenti climatici - UNFCC<sup>4</sup>.*

Agire per l'adattamento significa pertanto ridurre il rischio di esposizione della popolazione aumentando il grado di resilienza degli ambienti urbani, per far fronte in maniera meno traumatica ed irreversibile ad eventi meteorologici anche estremi.

L'unione Europea, con la pubblicazione del "White paper" sull'adattamento ai cambiamenti climatici (Commissione Europea, 2009) ha richiamato l'attenzione su tale punto, per poi definire una strategia unitaria che tutti i Paesi sono chiamati a seguire (European Commission, 2013). In molte città europee e degli Stati Uniti sono state definiti nuovi strumenti di pianificazione e strategie di azione che hanno al centro il tema del l'adattamento ai cambiamenti climatici.

Ad oggi, 54 città italiane si sono dotate di un piano di adattamento ai cambiamenti climatici, ma spesso la redazione riguarda solo alcuni aspetti degli impatti previsti, e comunque rappresenta una piccola percentuale rispetto alla totalità delle Municipalità italiane effettivamente a rischio.

Lo studio dei fenomeni climatici ed energetici a scala urbana risulta ancora scarsamente assimilato nella pratica della progettazione e della pianificazione urbana. Occorre ancora sviluppare e migliorare la conoscenza di base sugli impatti dei cambiamenti climatici, la mappatura

<sup>4</sup> "Adaptation refers to adjustments in ecological, social, or economic systems in response to actual or expected climatic stimuli and their effects or impacts. It refers to changes in processes, practices, and structures to moderate potential damages or to benefit from opportunities associated with climate change" - UNFCC, <http://unfccc.int/focus/adaptation/items/6999.php>

delle vulnerabilità locale e i costi e i benefici delle misure di adattamento.

In Italia, il Ministero dell'Ambiente ha prodotto il documento preliminare "Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (Ministero dell'Ambiente, 2013), che identifica i principali settori che subiranno gli impatti del cambiamento climatico e definisce gli obiettivi strategici e le azioni per l'adattamento. Per quanto riguarda il settore degli insediamenti urbani, si definiscono le seguenti linee di azione come prioritarie:

*1) Incentivare la ricerca sui cambiamenti climatici in una logica di downscaling, al fine di esplorare la loro natura e magnitudine nelle diverse parti del territorio italiano, e fornire in tal modo anche a livello locale elementi utili per comprenderne gli effetti e dunque per modulare le specifiche azioni di adattamento.*

*2. Mettere a punto linee guida per l'adattamento climatico a scala locale, fornendo metodologie, conoscenze e risorse utili sia alla redazione di carte di vulnerabilità e rischio climatici (risk assessment e risk ranking) sia alla successiva formazione di Piani di adattamento quali strumenti indispensabili per il burden sharing e per la programmazione della spesa ai diversi livelli (messa in sicurezza di insediamenti e infrastrutture, investimenti per garantire le risorse idriche ed energetiche, incentivi per attività produttive minacciate, assistenza a fasce sociali svantaggiate, ecc).*

*3. Promuovere la considerazione dei cambiamenti climatici negli strumenti di pianificazione, stabilendo standard energetici per il costruito (ovvero completando il recepimento della Direttiva 2010/31/CE sulle prestazioni energetiche degli edifici) e per gli spazi pubblici, contenendo il consumo di nuovo suolo e la sua impermeabilizzazione (anche scongiurando il ripetersi dei condoni), incentivando il recupero delle aree ed edifici dismessi o sottoutilizzati, incrementando la dotazione di verde urbano (comprensivo degli orti urbani) e il mantenimento/ripristino di aree naturali e seminaturali all'interno delle città promuovendo la mobilità sostenibile.*

*4) Incentivare la ricerca operativa in materia di adattamento climatico della città esistente (sperimentazione di nuovi materiali nell'edilizia, di metodi di zonizzazione della vulnerabilità climatica delle differenti parti dell'insediamento urbano, esplorazione degli effetti climatici dell'albedo, delle superfici artificializzate, della vegetazione arborea) anche al fine di mettere a punto standard e indicatori di efficienza climatica da applicarsi alle trasformazioni urbane.*

Per una effettiva integrazione delle politiche di adattamento climatico nella pianificazione occorre pertanto in primo luogo sviluppare un corpo di conoscenze adeguato in materia di vulnerabilità climatica della città esistente, che consenta la comprensione dei fenomeni a scala locale e la programmazione delle specifiche azioni di adattamento da intraprendere.

Tale lavoro è risultato finora difficile in quanto gli studi climatici sono sviluppati ad una scala maggiore rispetto a quella urbana e locale. I modelli di predizione dei cambiamenti climatici utilizzati dagli scienziati dell'IPCC operano ad una risoluzione di circa 100 Km e risultando inadeguati all'applicazione diretta nei settori della pianificazione o della progettazione architettonica ed urbana (Beckers, 2016).

Il primo passo per la redazione di un piano di adattamento è pertanto l'approfondimento della conoscenza rispetto all'andamento spaziale e temporale dei fenomeni climatici ed energetici a scale adeguate, che consenta la costruzione di mappe delle vulnerabilità climatiche locali, in modo che sia chiaro dove concentrare gli interventi e gli investimenti. Per fare ciò, i decisori devono avere a disposizione strumenti "nuovi" di analisi delle dinamiche urbane, che comprendano gli aspetti di climatologia e meteorologia.

La definizione di un buon piano di adattamento è forse oggi l'unica via percorribile per garantire la sopravvivenza degli habitat umani più diffusi sulla terra, vale a dire le città. Ma la comprensione dei fenomeni climatici e degli impatti sul territorio, sulla sicurezza e sulla salute dell'uomo, coinvolge necessariamente settori scientifici differenti, dall'area medica, all'ingegneria alla fisica. Solo attraverso la costruzione di un sistema integrato dei saperi è possibile affrontare la sfida dell'adattamento in modo consapevole ed efficace.

In tale contesto l'ingegneria e l'architettura devono essere in grado di far proprie le conoscenze ed i risultati conseguiti in ambiti differenti per apportare significativi avanzamenti nella ricerca teorica ed applicata agli insediamenti urbani.

Le aree urbane sono la parte del Pianeta dove si potrebbero pagare i maggiori costi sociali delle conseguenze dell'azione dell'uomo stesso sull'ambiente e sul clima e per queste ragioni appare sempre più urgente una specifica attenzione e collaborazione tra i settori disciplinari coinvolti, per la definizione congiunta di strategie di adattamento e riduzione dell'intensità energetica del sistema che siano in grado di preservare l'habitat più caro all'umanità intera.

### 1.3 Densità, città compatta e città diffusa

La transizione alla città “petrolifera” sembra aver cancellato quel complesso di conoscenze tecniche, tradizionali e tecnologiche, che garantivano una climatizzazione naturale degli ambienti ed uno sfruttamento ottimale delle risorse naturali, in particolar modo della radiazione solare, in funzione delle potenzialità dello specifico contesto climatico di appartenenza (Los, 2007).

La domanda che oggi ci poniamo è la seguente: come possiamo recuperare e adattare le nostre città ai cambiamenti climatici quando la maggior parte del patrimonio edilizio è stato costruito in perfetta contraddizione con il clima di appartenenza? Quali strumenti conoscitivi abbiamo a disposizione per comprendere l’effetto della morfologia e della densità dell’edificato sul clima urbano?

La necessità di confrontarsi con le conseguenze positive e negative della “densità” nell’ambito della pianificazione urbana non è affatto recente, ma l’uso di tale concetto è variato significativamente durante la storia della pianificazione e della progettazione.

Prima del XX secolo, la densità delle città era solo il risultato del complesso di fattori che determinavano il processo di sviluppo urbano: tecniche costruttive, tradizioni, disponibilità di risorse energetiche, cultura, clima contribuivano nell’insieme a individuare la densità possibile della città antica (De Pascali, 2008; Pont & Haupt, 2010). A partire dalla metà del XIX secolo nasce la questione del sovraffollamento nelle città industriali, che comporta problematiche di igiene, sicurezza e problemi sociali. In questa epoca nascono i primi vincoli normativi sulle “densità massime” ammissibili, che corrispondono all’introduzione di un approccio scientifico alla gestione dell’espansione urbana, in un periodo di boom economico e demografico (Pont & Haupt, 2009).

Negli ultimi decenni si è aperto invece un dibattito intellettuale internazionale sulle conseguenze ambientali e sociali corrispondenti a diverse modalità di crescita delle aree urbane. In particolare, a partire dagli anni ‘60 e ‘70, l’attenzione si è concentrata sugli aspetti positivi e negativi di due modalità di organizzazione dell’edificato sul territorio: il modello “compatto” e il modello “diffuso” (o disperso). La contrapposizione tra “Compact city” e “urban sprawl” e la proposta di modelli insediativi alternativi (New Urbanism, Car free City, Low Carbon Cities) sono il frutto di una riflessione disciplinare sulla sostenibilità della città del XX secolo, intesa in termini energetici, ambientali e sociali.

A differenza del passato, in cui la densità e la morfologia dell’edificato rispondevano ai vincoli del contesto geografico e climatico, o all’epoca Moderna, in cui la categoria della densità è stata utilizzata per un’organizzazione urbana funzionale all’incremento esponenziale della popolazione, oggi lo studio della relazione tra morfologia e clima si pone in termini nuovi: l’attenzione si è spostata sulle forme e densità urbane che garantiscono il minor impatto sul clima e contribuiscono, in modo passivo, al raggiungimento del comfort senza grandi dispendi energetici. Solo in tal modo è possibile perseguire l’unico vero obiettivo per una città più sostenibile: vale a dire la riduzione della domanda energetica a scala urbana e dei relativi impatti ambientali.

Il tema della relazione tra densità, morfologia e sostenibilità è pertanto ancora di grande interesse. Sebbene il trend di crescita della popolazione urbana in Europa sia piuttosto stabile, quando non in calo, i consumi già elevatissimi del Vecchio continente continuano a crescere, come continua crescere la città fisica, in termini di edifici, infrastrutture e occupazione di territorio. La crescita della città non corrisponde all’aumento della domanda abitativa (che esiste, ma non per mancanza di alloggi bensì per ragioni speculative e di impoverimento delle categorie svantaggiate), ma deriva da una serie di fattori quali l’aumento generale del tenore di vita, la terziarizzazione del territorio, il cambiamento dello stile e dei ritmi di vita e, non per ultimo, dell’organizzazione insediativa (De Pascali, 2008).





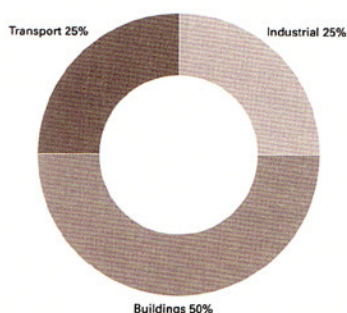
**Figura 19** "Where we live". Fonte: *Urban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007

Come già evidenziato, la questione urbana che ci si presenta oggi è il frutto di politiche economiche basate sulla logica consumista ed espansiva che, rispondendo solo a logiche speculative, sono rimaste volutamente cieche rispetto ad aspetti razionali di sfruttamento delle risorse energetiche e del territorio. La costruzione di un percorso condiviso e collettivo che permetta la transizione verso modelli urbani effettivamente più sostenibili ed ecocompatibili necessita in primo luogo di un'analisi dei fattori che governano i fenomeni energetici e climatici a scala urbana, in modo da poter correggere la direzione autodistruttiva derivante dallo sfruttamento indiscriminato delle risorse del pianeta.

La configurazione spaziale e funzionale della città costituisce una variabile importante del comportamento energetico globale, in quanto influenza, in maniera diretta o indiretta due categorie di "consumi urbani": i consumi per il comfort e quelli per il trasporto.

I consumi per il comfort riguardano l'insieme della spesa energetica necessaria a garantire il benessere fisico e psicologico degli utenti, in funzione dell'uso preposto (De Pascali, 2008). In questo insieme rientrano pertanto i consumi per il riscaldamento, per la climatizzazione estiva, per la salubrità dell'aria, per l'illuminazione delle abitazioni, dei luoghi di lavoro, delle attrezzature collettive e degli spazi aperti. Tale categoria di consumi è strettamente connessa alle caratteristiche localizzative e climatiche dell'insediamento, ma non solo. Anche la "forma urbana" e l'uso del suolo rappresentano variabili altrettanto significative, in quanto determinano modificazioni delle risorse naturali disponibili, e quindi degli apporti energetici passivi e del clima locale. Basti pensare all'influenza della struttura urbana rispetto agli apporti solari, che si traduce in una variazione di disponibilità di luce e calore per gli ambienti interni o per gli spazi pubblici più "ostruiti" (Beckers, 2012; Curreli & Coch, 2010; Morganti et al. 2012).

Inoltre la compattezza e la densità dell'insediamento, le tipologie edilizie presenti, il grado di impermeabilizzazione dei suoli, la composizione di vuoti e pieni, la scarsità di vegetazione e acqua e finanche la colorazione delle superfici influenzano il bilancio energetico globale del sistema, determinando modificazioni rilevanti in termini di temperatura, umidità, luce e ventilazione naturale, che chiaramente influiscono sulla domanda energetica necessaria a garantire



**Figura 20** "Global Energy Use". Fonte: *Urban Age Project - LSECities*, Burdett & Sudjic, 2007

condizioni di comfort soddisfacenti (Rogora & Dessì, 2005; Stiles et al., 2014).

Una seconda, fondamentale, categoria di consumi è costituita dai trasporti, ovvero dai dispendi energetici necessari alla movimentazione di merci e persone all'interno della città stessa. In questo caso la conformazione spaziale e l'estensione dell'insediamento assumono un ruolo rilevante, in quanto condizionano la lunghezza, la durata, il numero e le modalità di spostamento per svolgere le attività quotidiane. La forma urbana incide pertanto sia sulla quantità che sulla "natura" del trasporto, favorendo o meno lo sviluppo di una mobilità sostenibile o di un sistema di trasporto pubblico efficiente. In tal senso il modello urbano della città organizzata secondo la zonizzazione funzionale, prefigurato e sostenuto da illustri teorici del Movimento Moderno e attuato nello sviluppo di larga parte delle città occidentali, ha mostrato grandi limiti, tra gli altri, proprio nella sua *"forza generatrice di spostamenti continui, ricorrenti e crescenti in relazione alla separazione delle funzioni"* (De Pascali, 2008).

La concentrazione di questi due tipi di consumi nelle città fa sì che esse rappresentino il luogo di produzione del 75% dei consumi globali (Burdett & Sudjic, 2007). Ad oggi, infatti, i consumi associati al sistema industriale sono in diminuzione, a fronte di un progressivo spostamento degli impieghi energetici verso il settore residenziale e dei servizi.

In tale contesto generale si inquadra la ricerca che studia le relazioni tra forma e consumi urbani. Il dibattito in materia coinvolge professionalità e competenze più svariate, muovendo dal mondo accademico fino a toccare il mondo politico e le amministrazioni territoriali, prestandosi a declinazioni più o meno scientifiche e quantificabili a sostegno di modelli urbani alternativi. Se da un lato, infatti, risulta chiara l'esistenza di una relazione tra "forma urbana" e "energia", non appare altrettanto semplice né la definizione né la comprensione della loro interdipendenza.

Il dibattito attorno a questi temi è incardinato attorno a tre parole chiave: densità, città compatta e "sprawl".

Oggi l'alta densità e la "compact city" sono spesso interpretate come una condizione necessaria per una crescita urbana ed economica sostenibile (Holden & Norland, 2005; Jenks et al., 1996; OECD Green Growth Studies, 2012).

I concetti di città compatta, sprawl e densità si prestano però a interpretazioni non univoche e sono utilizzati per descrivere aspetti a volte quantitativi, a volte qualitativi dell'ambiente costruito, a volte legati alla sfera percettiva altre alle conseguenze energetiche ed ambientali a scala urbana.

Il concetto di densità mette in relazione una certa "quantità" per "unità di misura", ovvero determina la proporzione del numero di "unità" in un determinato dominio (area o volume). La densità è pertanto un numero che si presta a descrivere una molteplicità di fenomeni nel contesto urbano. In qualche maniera possiamo affermare che la densità è sinonimo di "intensità" e pertanto si presta a quantificare sia fenomeni fisici-oggettivi che percettivi-soggettivi.

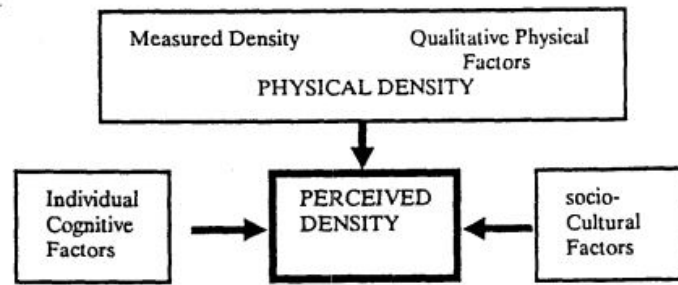
La prima distinzione che occorre pertanto fare è tra la "densità fisica" e la "densità percepita", perché la percezione "soggettiva" della densità può essere anche molto differente da una sua analisi quantitativa-oggettiva. La percezione della densità di un contesto urbano varia a seconda di un insieme di fattori, tra cui la "densità fisica" assume un ruolo pari agli aspetti cognitivi e socio-culturali individuali (Alexander et al., 1988; Pont & Haupt, 2010).

La "densità fisica" si basa invece su caratteristiche fisiche oggettive del costruito in una determinata area di riferimento. Anche in questo caso occorre specificare che esistono numerose "misure" della densità, che rappresentano aspetti quantitativi e qualitativi della densità urbana, più o meno utili a seconda dell'obiettivo dell'analisi (densità di popolazione, densità di alloggi, densità di superficie coperta, densità di superficie costruita, altezza media degli edifici etc.) (Alexander et al., 1988; Pont & Haupt, 2010).

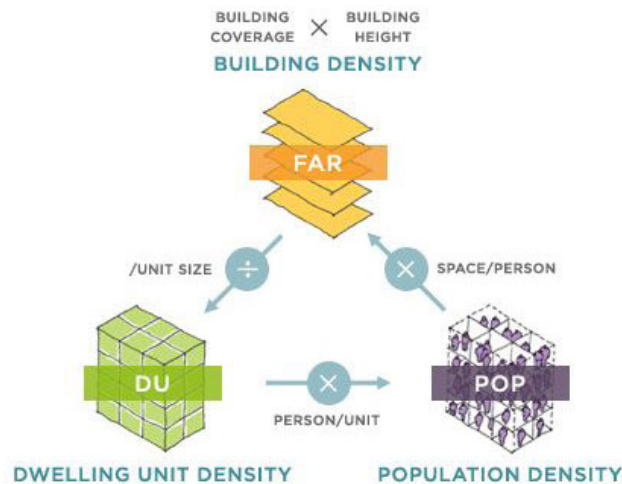
## » IL CONCETTO DI DENSITÀ

Numerosi studi hanno preso a riferimento sia il concetto di "densità percepita" che di "densità

**Figura 21** Fattori che contribuiscono alla "percezione" della densità, Fonte: Alexander, Reed, Murphy, 1988



**Figura 22** Possibili misure della "Densità fisica", Fonte: MIT DENSITYatlas, <http://densityatlas.org/measuring/metrics.shtml>



fisica" per muovere una profonda critica allo sprawl urbano delle città americane. Lo sprawl urbano è indubbiamente relazionato con il concetto di densità, ma anche con aspetti organizzativi e di governo del territorio. Secondo Downs (Downs, 1999), le caratteristiche dello sprawl urbano sono 10:

#### » CARATTERISTICHE DELLO SPRAWL

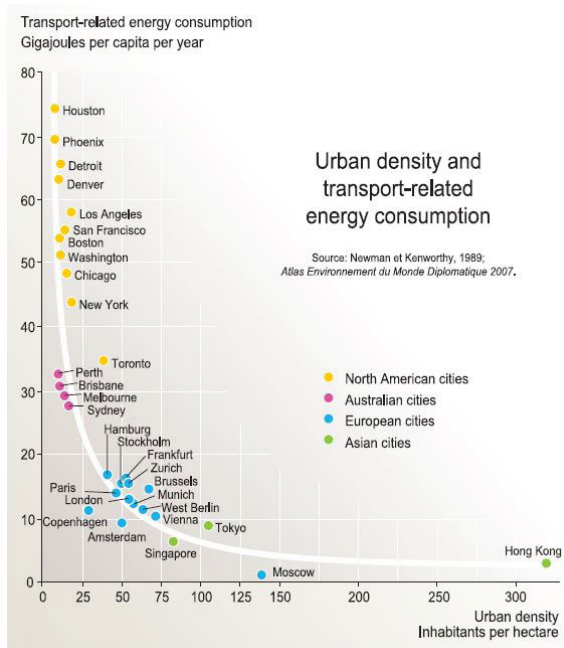
(1) *Sviluppo illimitato verso l'esterno dei nuovi insediamenti*, (2) *bassa densità degli insediamenti residenziali e commerciali*, (3) *segregazione spaziale delle aree urbanizzate - "leapfrog development"* (4) *Controllo e gestione del territorio frammentato tra le diverse amministrazioni locali* (5) *dominanza del trasporto privato su gomma*, (6) *mancanza di pianificazione e controllo centrale dell'uso del suolo* (7) *sviluppo illimitato delle attività commerciali lungo le vie principali* (8) *significative differenze fiscali tra municipalità adiacenti*, (9) *zonizzazione delle funzioni* (10) *fiducia nell'effetto "a cascata" per fornire alloggi a famiglie a basso reddito*<sup>5</sup>.

I primi studi sullo sprawl nascono come critica al modello urbano americano, ma data l'espansione del fenomeno anche alla realtà europea e dati gli impressionanti ritmi di crescita delle metropoli nel resto del mondo, il tema dello sprawl e del consumo di suolo è oggi al centro dell'attenzione a livello globale.

Ad oggi risulta oramai quasi universalmente condivisa l'opinione che, a fronte di alcuni limitati e discutibili benefici di tipo individuale, i processi dell'insediamento disperso comportano maggiori costi ambientali, sociali e finanziari per la collettività rispetto a configurazioni più compatte. Tra gli effetti negativi prodotti dalla dispersione abitativa occorre annoverare al primo posto l'eccessivo consumo di risorse naturali ed energetiche. La densità del costruito, come già osservato, incide in maniera rilevante sui consumi energetici urbani, siano essi quelli per gli spostamenti di merci o persone, quelli per la climatizzazione degli edifici abitativi o dei servizi,

<sup>5</sup> Testo originale: (1) *unlimited outward extension of development*, (2) *low-density residential and commercial settlements*, (3) *leapfrog development*, (4) *fragmentation of powers over land use among many small localities*, (5) *dominance of transportation by private automotive vehicles*, (6) *lack of centralized planning or control of land uses*, (7) *widespread strip commercial development*, (8) *great fiscal disparities among localities*, (9) *segregation of types of land use in different zones*, and (10) *reliance mainly on the trickle-down or filtering process to provide housing to low-income households*, (Downs, 1999)

**Figura 23** Densità di popolazione e consumo energetico per il trasporto: Fonte: Emmanuelle Bournay, UNEP/GRID-Arendal, [http://www.grida.no/graphicslib/detail/urban-density-and-transport-related-energy-consumption\\_eda9#](http://www.grida.no/graphicslib/detail/urban-density-and-transport-related-energy-consumption_eda9#)



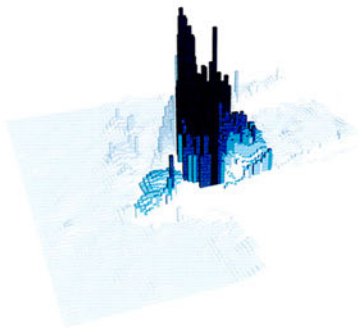
**Figura 24** Numero di auto ogni 1000 abitanti. Fonte: Urban Age Project - LSE Cities, Burdett & Sudjic, 2007



## DENSITY

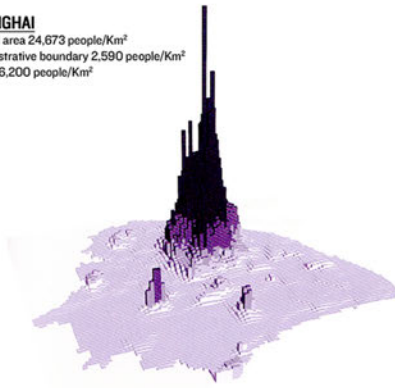
### NEW YORK CITY

Central area 15,361 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 9,600 people/km<sup>2</sup>  
Peak 53,000 people/km<sup>2</sup>



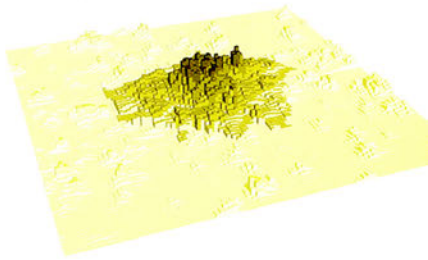
### SHANGHAI

Central area 24,673 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 2,590 people/km<sup>2</sup>  
Peak 96,200 people/km<sup>2</sup>



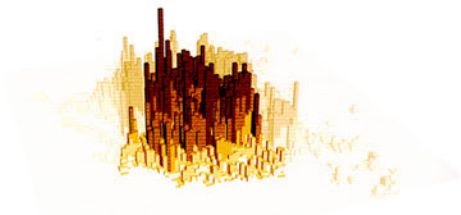
### LONDON

Central area 7,805 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 4,800 people/km<sup>2</sup>  
Peak 17,200 people/km<sup>2</sup>



### MEXICO CITY

Central area 12,541 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 5,880 people/km<sup>2</sup>  
Peak 48,300 people/km<sup>2</sup>



### JOHANNESBURG

Central area 2,270 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 1,960 people/km<sup>2</sup>  
Peak 38,500 people/km<sup>2</sup>



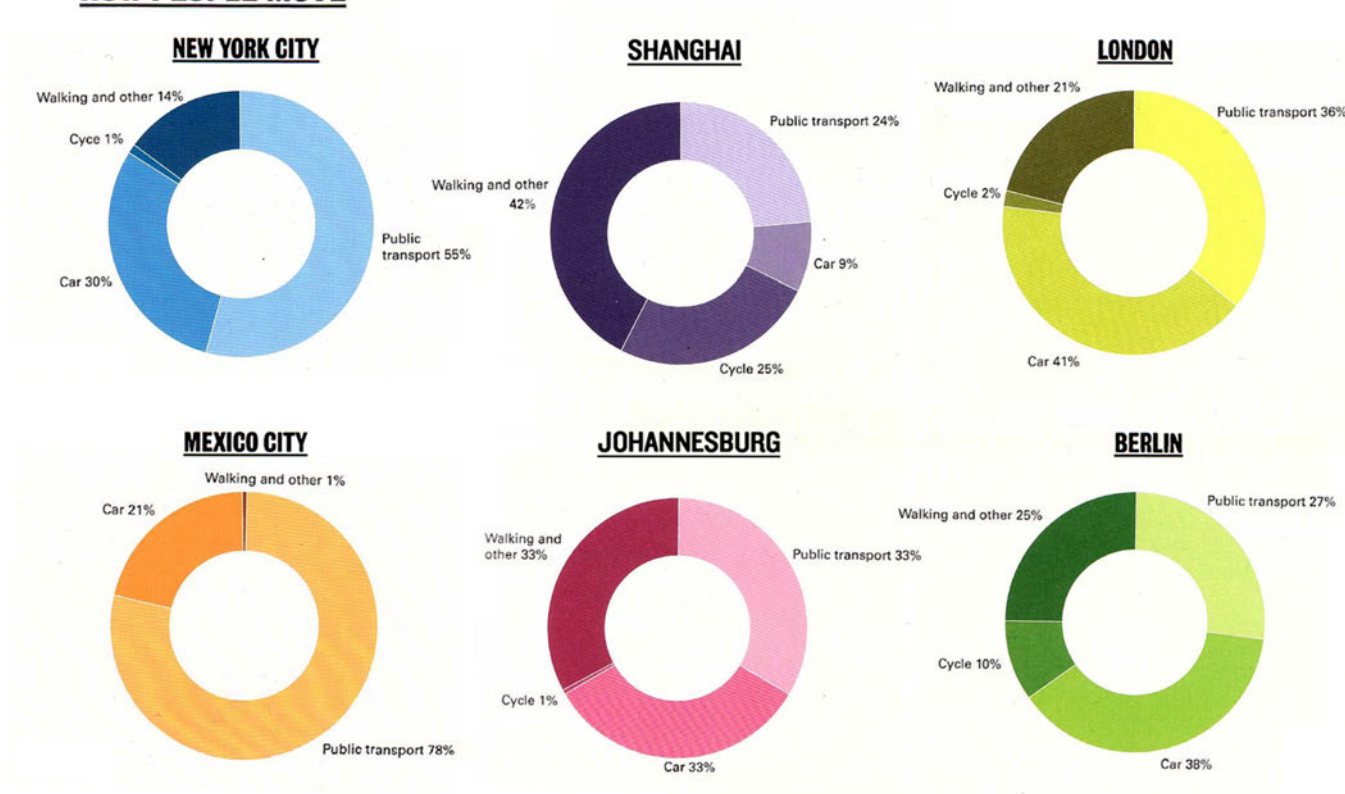
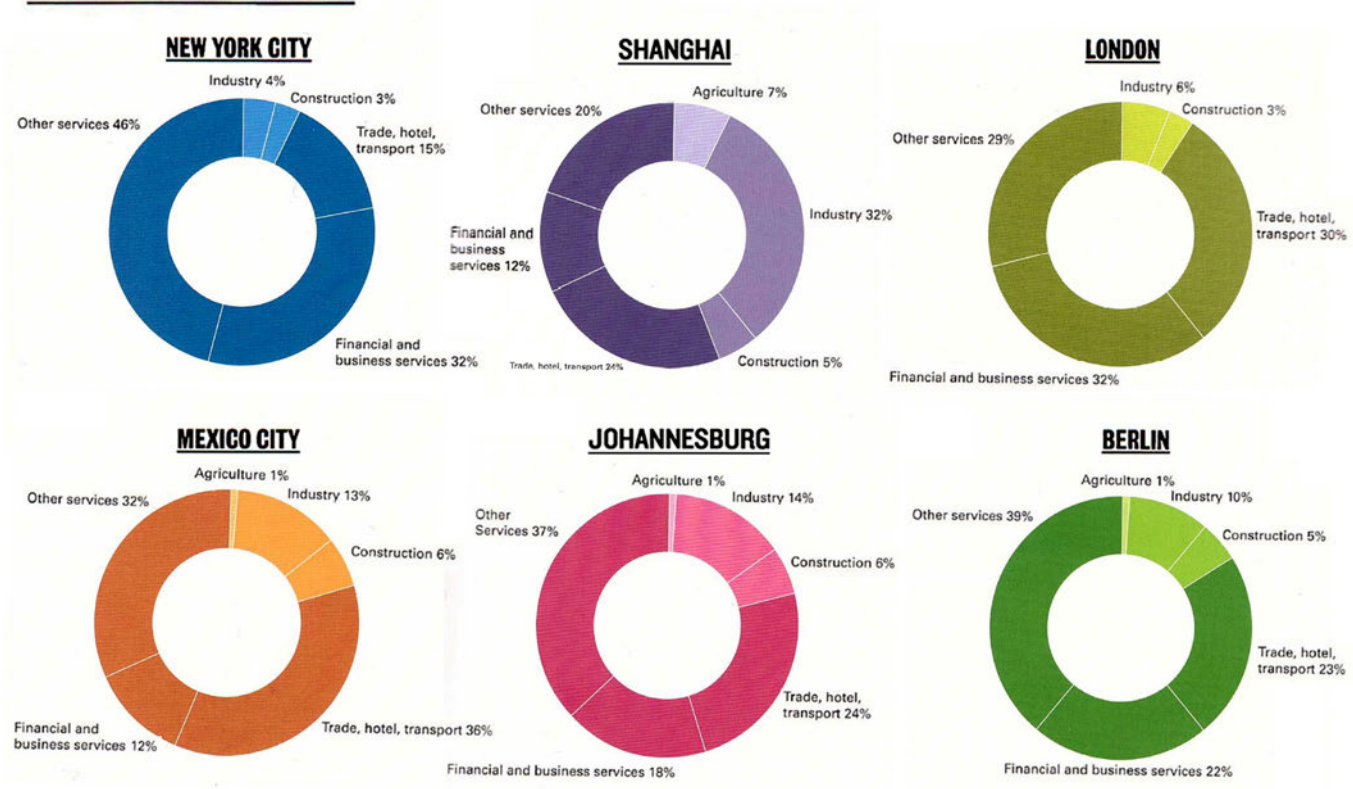
### BERLIN

Central area 7,124 people/km<sup>2</sup>  
Administrative boundary 3,810 people/km<sup>2</sup>  
Peak 21,700 people/km<sup>2</sup>



**Figura 25** Distribuzione della densità nelle 6 città di Urban Age Project - LSE Cities, Burdett & Sudjic, 2007



**HOW PEOPLE MOVE**Figura 26 Mobilità nelle 6 città di *Urban Age Project* - LSECities, Burdett & Sudjic, 2007**THE ECONOMY OF CITIES**Figura 27 Distribuzione delle funzioni nelle 6 città di *Urban Age Project* - LSECities, Burdett & Sudjic, 2007

o infine quelli per il funzionamento e la manutenzione delle infrastrutture urbane.

In questo specifico campo di ricerca predominano gli studi nordamericani, inglesi e australiani, evidentemente stimolati dalla diffusione del fenomeno in atto nei loro territori. Nell'Europa Mediterranea il tema è più recente come ambito di studio, nonostante il fenomeno della dispersione abitativa sia un dato di fatto da almeno 30 anni a questa parte (Tombolini et al., 2015).

Il più famoso e citato studio, nato con l'intento di svelare le conseguenze ambientali, sociali ed energetiche della dispersione insediativa è senza dubbio "The cost of sprawl" (Real Estate Research Corporation, 1974), pubblicato negli Stati Uniti all'indomani della prima crisi energetica del 1973. Tale lavoro rappresenta il primo studio scientificamente costruito volto a sferrare un duro attacco al fenomeno dello sprawl, quantificandone i "costi" per la collettività in contrapposizione a modelli urbani più compatti. Lo studio ha il merito di isolare, per la prima volta, i parametri di densità e localizzazione dell'insediamento urbano quali indicatori dei costi di sviluppo associati (Burchell, 1998).

Metodologicamente si fonda sulla comparazione della "performance" di 6 comunità di 10000 alloggi aggregati secondo diversi livelli di densità (da 19-20 alloggi per acro a 3-4 alloggi per acro). Sulla base dei casi di studio vengono valutati i "costi dello sprawl", in termini di costruzione (infrastrutture e alloggi), trasporti, energia ambiente e qualità della vita. Nella comparazione tra i vari modelli insediativi, il modello a più alta densità risultava decisamente il più favorevole per quanto riguarda il risparmio energetico, il contenimento delle emissioni inquinanti ed i costi di costruzione e funzionamento.

Lo studio in questione è stato oggetto di numerose critiche, relative anche al metodo di calcolo e individuazione dei parametri di valutazione ambientale ed economica (Burchell, 1998); tuttavia i risultati proposti sono stati citati a supporto della tesi della città ad alta densità da innumerevoli studiosi e rappresentano una tesi oggi ampiamente condivisa, quantomeno nelle conclusioni generali.

Una ricerca più recente, "The cost of sprawl – Revisited" (Burchell, 1998) ha operato una revisione degli studi sullo sprawl prodotti negli anni successivi, concludendo che ricorrentemente si opta per una "descrizione" delle caratteristiche dello sprawl, piuttosto che una loro quantificazione. Tuttavia l'analisi di letteratura conferma le conclusioni generali già tracciate nello studio del 1974, suggerendo una correzione del modello espansivo urbano americano.

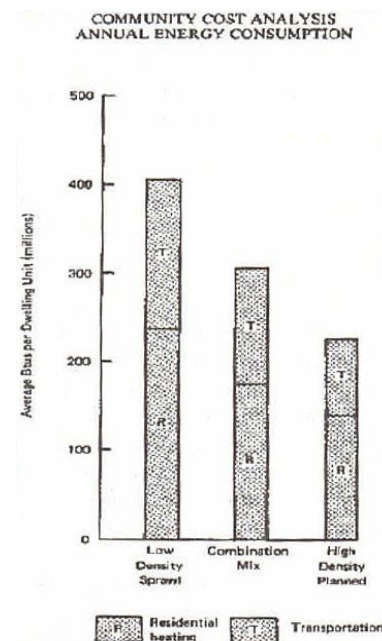
Il concetto di città compatta, nasce proprio come modello in contrapposizione alla città "zonizzata" e diffusa, proposto come "modello urbano sostenibile", energeticamente più efficiente, meno inquinante e socialmente più equo.

Alla base del movimento per la promozione della "Compact City" vi sono le teorie di Jane Jacobs (1961), che critica aspramente il modello urbano americano associando un significato positivo alla densità abitativa. La "densità di alloggi", insieme ad un adeguato mix funzionale, viene posta come una condizione necessaria per una vita urbana e di quartiere partecipata e vitale. Sulla base di tali considerazioni sono nati vari movimenti (Compact City Movement – New Urbanism) che sostengono che la città compatta giochi un ruolo importante nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità urbana, influenzando la vita degli abitanti e l'uso dello spazio della città e garantendo una migliore performance ambientale, sociale ed economica.

Ma la difesa a spada tratta del modello compatto presenta anch'essa evidenti limiti, soprattutto perché fondata su valutazioni spesso di tipo qualitativo, forti della contrapposizione ad un modello universalmente riconosciuto come "non sostenibile".

La sostenibilità del modello compatto è, invece, tuttora da dimostrare. A fronte di numerosi studi di critica alla dispersione, risulta relativamente limitato il numero dei lavori dedicati all'esame del rapporto diretto tra consumi energetici e densità, specialmente da un punto di vista "quantitativo".

La "insostenibilità" del modello diffuso è fondata principalmente sulle conseguenze ambientali ed energetiche derivanti dai trasporti, in virtù delle distanze, dei tempi e dei costi indubbiamente



**Figura 28** Costi energetici associati a diversi livelli di densità nello studio The cost of sprawl, 1974. Tratto da De Pascali, 2008

te maggiori rispetto ad un sistema compatto.

Non è altrettanto evidente, invece, l'effetto che dense aree urbanizzate hanno sull'ambiente, sul paesaggio, sulla qualità dell'aria e delle acque ed in generale sulla qualità di vita dei cittadini se non si considera in modo adeguato il comportamento energetico complessivo di tale sistema.

Come esplicitato da Neuman (2005), possiamo infatti parlare di un "paradosso della città compatta" – The Compact city fallacy - , per cui l'incremento della densità per scongiurare gli effetti dello sprawl può determinare un basso grado di vivibilità delle città, dovuto alla mancanza di luce e aria. Oltre a tale contraddizione, va evidenziato che la mancanza di una definizione generalmente accettata di "città compatta", o città densa, genera molta confusione. Città compatta, densità, sostenibilità sono infatti concetti applicabili a differenti scale e studiati per differenti obiettivi che vanno adeguatamente definiti e dichiarati per poterne delimitare l'ambito di validità e applicabilità dei risultati.

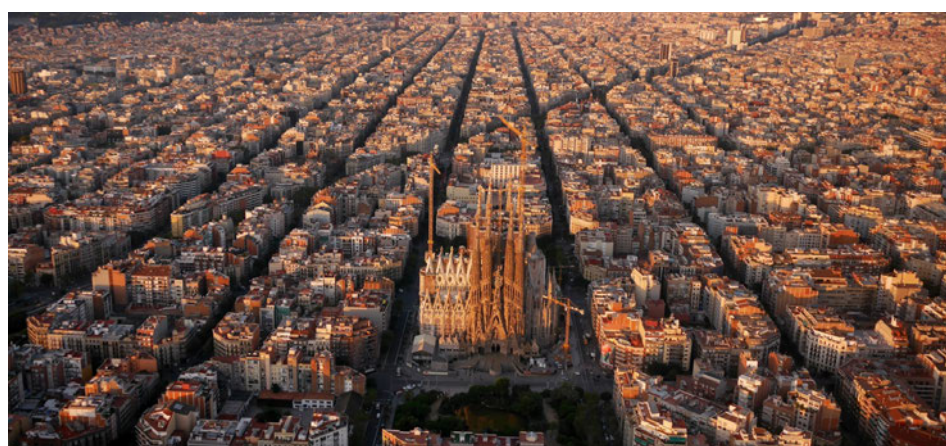
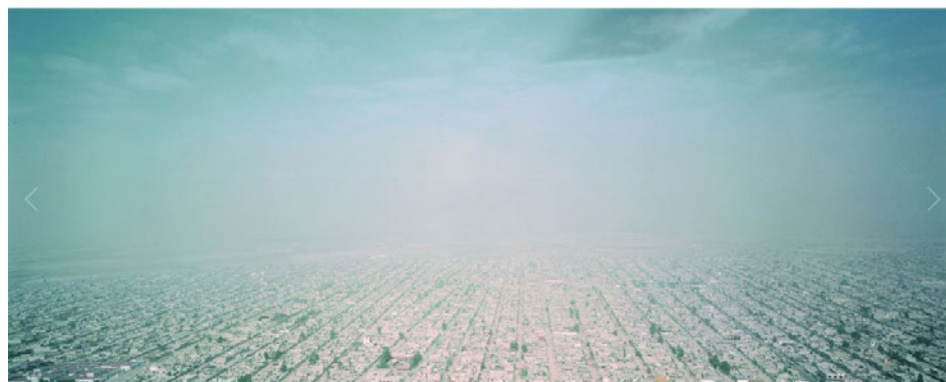
Il concetto di "città compatta", nell'uso comune e nel dibattito architettonico e urbanistico, fa riferimento tanto ad una organizzazione spaziale che politica e sociale della città. Per quanto esista una vasta letteratura in materia di "compact city", non esiste né una definizione generalmente accettata né un'evidenza empirica che dimostri la sua sostenibilità come modello di sviluppo (Neuman, 2005).

Tra le poche definizioni di città compatta troviamo quella dell'OECD (The Organisation for Economic Co-operation and Development) che definisce la "città compatta" mediante tre caratteristiche chiave (OECD Green Growth Studies, 2012):

**(1) Densità e prossimità dello sviluppo urbano:**

Nella città compatta il suolo è intensamente utilizzato, le varie parti della città sono contigue ed il confine con la campagna è chiaro. I concetti di "densità" e "prossimità" sono gli elementi fisici imprescindibili che caratterizzano la città compatta.

**(2) Aree urbane collegate attraverso un sistema di trasporto pubblico**



**» LE CARATTERISTICHE DELLA  
"COMPACT CITY"**

**Figura 29** Viste Aeree di Città del Messico e Barcellona Fonte: Città del Messico : Urban Age Project - LSE <https://lsecities.net/> , Barcellona, foto di Amos Chapple, <http://www.amoschapplephoto.com/air/>



Il trasporto pubblico permette gli spostamenti all'interno della città compatta e determina il suo effettivo funzionamento.

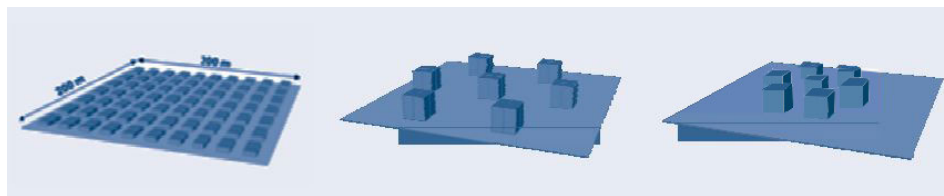
### (3) Accessibilità ai servizi locali e al luogo di lavoro

La città compatta si fonda sulla "mixité", pertanto consente agli abitanti di raggiungere facilmente i servizi locali, i servizi urbani, il lavoro o i luoghi dello svago attraverso distanze percorribili a piedi o con i mezzi pubblici

Neuman, a seguito dell'analisi dei principali studi sulla città compatta, arricchisce tale definizione evidenziando 14 caratteristiche ricorrenti (Neuman, 2005): (1) *Alta densità abitativa e alto numero di occupati*, (2) *Varietà di destinazioni d'uso*, (3) *Compresenza e prossimità di varie destinazioni d'uso in lotti relativamente piccoli*, (4) *Forte interazione economica e sociale*, (5) *Sviluppo continuo e contiguo*, (6) *Sviluppo urbano contenuto e con limiti ben definiti*, (7) *Presenza di infrastrutture urbane (fognatura e rete idrica)*, (8) *Trasporto multi-modale*, (9) *Alto livello di accessibilità: locale e regionale*, (10) *Alto livello di connessione stradale (interno ed esterno), inclusi percorsi pedonali e ciclabili*, (11) *Alta percentuale di superficie impermeabile*, (12) *Spazi aperti ridotti (proporzioni)*, (13) *Pianificazione urbana unitaria o coordinata*, (14) *Sufficiente disponibilità fiscale del governo per il finanziamento dei servizi urbani e delle infrastrutture*<sup>6</sup>

Come anticipato, gli studi finora prodotti sulla città compatta non hanno individuato relazioni dirette quantificabili tra le caratteristiche fisiche-morfologiche della forma urbana ed il suo

<sup>6</sup> Testo originale: 1. High residential and employment densities 2. Mixture of land uses 3. Fine grain of land uses (proximity of varied uses and small relative size of land parcels) 4. Increased social and economic interactions 5. Contiguous development (some parcels or structures may be vacant or abandoned or surface parking) 6. Contained urban development, demarcated by legible limits 7. Urban infrastructure, especially sewerage and water mains 8. Multimodal transportation 9. High degrees of accessibility: local/regional 10. High degrees of street connectivity (internal/external), including sidewalks and bicycle lanes 11. High degree of impervious surface coverage 12. Low open-space ratio 13. Unitary control of planning of land development, or closely coordinated control 14. Sufficient government fiscal capacity to finance urban facilities and infrastructure (Neuman, 2005)



**Figura 30** Figura che illustra il concetto di densità e prossimità, Fonte: OECD Green Growth Studies, 2012

Sub-characteristics of the compact city	Contribution to urban sustainability		
	Environmental benefits	Social benefits	Economic benefits
1. Shorter intra-urban travel distances	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fewer CO<sub>2</sub> emissions</li> <li>– Less pollution from automobiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Greater accessibility due to lower cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Higher productivity due to shorter travel time for workers</li> </ul>
2. Less automobile dependency	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fewer CO<sub>2</sub> emissions</li> <li>– Less pollution from automobiles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lower transport costs</li> <li>– Higher mobility for people without access to a car</li> <li>– Improved human health due to more cycling and walking</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Development of green jobs/technologies</li> </ul>
3. More district-wide energy utilisation and local energy generation	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Less energy consumption per capita, fewer CO<sub>2</sub> emissions</li> </ul>	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Development of green jobs/technologies</li> <li>– More energy independence</li> </ul>
4. Optimum use of land resources and more opportunity for urban-rural linkage	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Conservation of farmlands and natural biodiversity</li> <li>– Fewer CO<sub>2</sub> emissions due to shorter food travel mileage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Higher quality of life due to more recreational activities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rural economic development (urban agriculture, renewable energy, etc.)</li> </ul>
5. More efficient public service delivery	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Public service level for social welfare maintained by improved efficiency</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Lower infrastructure investments and cost of maintenance</li> </ul>
6. Better access to a diversity of local services and jobs	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Higher quality of life due to access to local services (shops, hospitals, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Skilled labour force attracted by high quality of life</li> <li>– Greater productivity due to more diversity, vitality, innovation and creativity</li> </ul>

**Tabella 1** I contributi della Città Compatta alla sostenibilità urbana, Fonte: OECD Green Growth Studies, 2012



grado di sostenibilità ambientale e sociale.

Jenks, Burton e Williams nello studio dal titolo "Compact city: a sustainable urban form?" (1996) eseguono un'indagine attraverso indicatori di sostenibilità sociale su 25 città inglesi, per valutarne l'equità sociale in relazione alle caratteristiche di compattezza del costruito. In conclusione si afferma che non è possibile individuare una relazione chiara tra fattori fisici-formali del costruito e la sostenibilità sociale della città, che ovviamente dipende da una molteplicità di altri fattori che vanno oltre la mera forma e compattezza dell'edificato.

Per quanto riguarda gli aspetti energetici, Neumann (2005) riporta i risultati di uno studio di Bouwman (2000) sul contesto olandese, in cui l'autore dimostra che a differenti configurazioni spaziali corrisponde una variazione massima del 5% del consumo pro capite per il trasporto, un valore che inficia la validità della tesi sulla sostenibilità della città compatta rispetto al risparmio energetico ed ambientale derivante da un più efficiente sistema di trasporto e mobilità.

Allo stato attuale gli studi che tentano di dimostrare la sostenibilità di un modello rispetto all'altro appaiono ancora incompleti e difficilmente comparabili, poiché le dinamiche sociali ed economiche che hanno portato alla predilezione di un modello di sviluppo più o meno compatto sono complesse e di difficile quantificazione.

Esistono tuttavia fattori oggettivi e misurabili rispetto a cui è possibile effettuare valutazioni della "performance" a scala urbana.

La morfologia urbana e la sua relazione con il clima ed il consumo energetico dell'edificato è uno di questi.

Rispetto agli studi che pretendono dimostrare la validità di un modello urbano rispetto ad un altro, risulta quindi più interessante un altro tipo di approccio, proposto da alcuni ricercatori che hanno analizzato le proprietà analitiche e descrittive della densità e la relazione tra i parametri di densità e le "performance urbane".

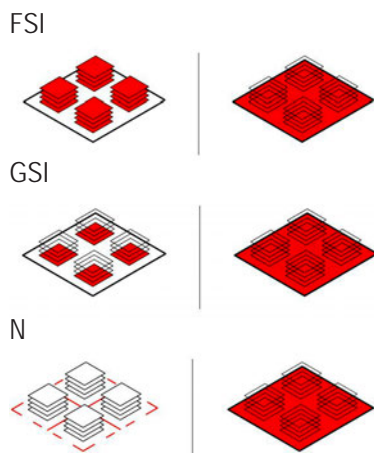
*"Our fascination with density is not primarily normative. We do not claim to know which density is the best, but are driven by the wish to understand the relational logic between density and different spatial and non-spatial properties. In our opinion this is a prerequisite to understand and successfully predict the effects of specific design and planning proposals"* (Pont & Haupt, 2010)."

Pont e Haupt nella ricerca "Spacematrix" (2010) individuano un sistema multivariabile di analisi della densità fisica fondato su tre indici:

L'intensità (FSI)

La compattezza (GSI)

La densità della rete (N)



**Figura 31** I tre principali parametri di densità per l'analisi della forma urbana e delle prestazioni urbane nella ricerca *Spacematrix* (Pont & Haupt, 2010)

La combinazione dei tre indici è in grado di fornire indicazioni sia quantitative che qualitative della forma urbana. Gli indici possono essere applicati alla scala del blocco, dell'isolato del tessuto e del quartiere, consentendo di misurare non solo la "quantità" dell'edificato ma anche la "qualità" dello spazio urbano, in termini di tipologia e forma. Tale approccio consente inoltre di esplicitare le relazioni tra i parametri oggettivi di densità e vari tipi di "performance urbane", consentendo una valutazione comparativa del comportamento di diverse morfologie e conformazioni dell'edificato.

L'applicazione di questo tipo di approccio alle morfologie ricorrenti nella realtà urbana europea apre la strada ad un confronto scientificamente fondato sulla performance energetica ed ambientale della città compatta esistente. Numerosi studi, tra cui il presente lavoro di tesi,

<sup>7</sup> Traduzione: "Il nostro fascino per la densità non è di tipo normativo. Non pretendiamo di sapere quale densità sia la migliore, ma siamo spinti dal desiderio di capire le relazioni logiche tra la densità e diverse proprietà spaziali e non. A nostro parere questo è un prerequisito per capire e prevedere efficacemente gli effetti delle specifiche proposte di progettazione e pianificazione" - Meta Berghauer Pont e Per Haupt, 2010, *SPACEMATRIX Space, Density and Urban Form*, NAI publishers, p.7

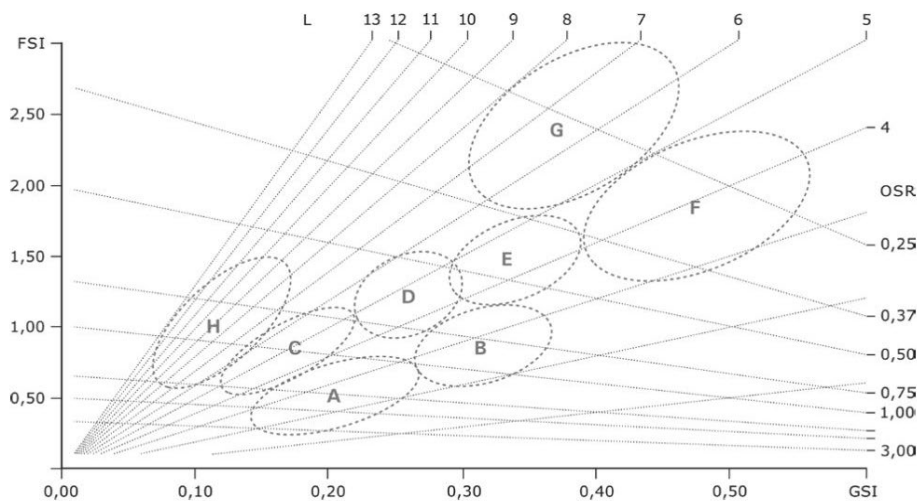


Figure 6. Land development typologies:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| A. Low-rise spacious strip developments blocks | E. Mid-rise compact building |
| B. Low-rise compact strip developments blocks  | F. Mid-rise closed building  |
| C. Mid-rise open building blocks               | G. Mid-rise super blocks     |
| D. Mid-rise spacious building blocks           | H. High-rise developments    |

**Figura 32** Analisi delle tipologie urbane mediante il grafico *Spacemate*, (Pont & Haupt, 2010)

sono stati avviati assumendo questo punto di vista e verranno ampiamente esposti nei capitoli successivi.

La rilevanza di queste nuove sperimentazioni consiste nell'approccio scientifico al tema della relazione tra forma, densità e performance energetica, che consente lo sviluppo di strumenti di analisi operativi a sostegno dell'attività progettuale e di governo del territorio, verso una effettiva riduzione della domanda energetica a scala urbana.

## I.4 Sostenibilità urbana: la necessità di un cambio di scala

Le problematiche esposte nei paragrafi precedenti sottolineano come il tema della sostenibilità rappresenti oggi il termine di confronto più importante nel campo delle scelte di un progetto urbano ed edilizio.

Alla luce del ruolo rivestito dal complesso della città costruita nella determinazione dell'impatto ambientale globale, ed in previsione dell'incremento della popolazione urbana, la questione della sostenibilità si pone come un vero e proprio dovere morale per tutti gli operatori coinvolti in azioni di pianificazione, trasformazione, riqualificazione e rigenerazione urbana.

Tale convinzione sembra oggi universalmente condivisa ma, purtroppo, non è altrettanto vero che abbia portato ad esiti efficaci e a conseguenze tangibili sul territorio e sull'ambiente. Se da un lato, infatti, la ricerca nel campo della sostenibilità urbana ed edilizia dovrebbe aver raggiunto livelli di maturità a 50 anni dall'emergere della questione energetica, dall'altro l'impegno accademico è stato spesso accusato di essere rimasto su livelli troppo astratti di analisi, non traducendosi in strumenti e tecniche innovative da applicare alla città reale.

Allo stesso tempo gli indirizzi e gli obblighi normativi in materia di risparmio energetico hanno ridotto l'approccio alla sostenibilità a interventi di tipo tecnologico, di efficientamento degli impianti o al più hanno posto vincoli stringenti alle nuove costruzioni, senza incidere in maniera significativa sui consumi del patrimonio edilizio esistente e senza cogliere le dinamiche più complesse che si instaurano alla scala urbana.

Le operazioni di efficientamento energetico applicate agli impianti, qualora non affiancate da strategie efficaci di riduzione della domanda a scala di edificio e urbana, risultano fallimentari in partenza, oltre che concettualmente sbagliate. Se consideriamo la ricaduta di queste operazioni a lungo termine, queste scelte si rivelano assai poco convenienti: la vita utile degli impianti si attesta intorno ai 15-20 anni, mentre gli edifici hanno una aspettativa di almeno 100 anni ma soprattutto la struttura e la morfologia urbana persiste pressoché invariata per centinaia di anni.

Senza un cambio di scala nell'approccio al problema della sostenibilità energetica e ambientale si rischia pertanto non solo di non ottenere risultati efficaci, ma anche di investire in maniera errata le scarse risorse deputate al miglioramento del comportamento energetico del settore edilizio.

Negli ultimi anni gli strumenti che più di tutti hanno inciso sulla pratica professionale sono state le Direttive Europee ed i relativi, e tardivi, recepimenti in ambito nazionale. Occorre riconoscere che queste iniziative hanno consentito l'introduzione del tema del risparmio energetico e della riduzione dell'impatto ambientale nella pratica comune della progettazione. Oggi la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici rappresenta una condizione per l'esistenza stessa del bene nel mercato immobiliare (vedi l'obbligatorietà della certificazione energetica a fini commerciali). Ma le misure previste dagli strumenti normativi non risultano ancora affatto sufficienti a guidare una trasformazione efficace del patrimonio in modo da ottenere benefici a scala urbana.

La direttiva Europea 2010/31/UE, che norma le prestazioni energetiche delle nuove costruzioni e della riqualificazione dell'esistente, in Italia è stata recepita, in ritardo, con il DL 4 giugno 2013 n.63, che modifica il precedente Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192<sup>8</sup>. La Direttiva sostanzialmente prevede che la prestazione energetica debba essere indicata negli annunci

8 *L'ultimo adeguamento è il Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici- che riguarda i metodi di calcolo per la redazione dell'Attestato di Prestazione Energetica ed i requisiti per gli edifici a energia quasi zero. La direttiva europea successiva, 2012/27/UE, recepita con il Decreto Legislativo 4 luglio 2014, riguarda principalmente il settore industriale e gli edifici delle Pubbliche Amministrazioni.*

di vendita o locazione degli immobili, che i Paesi dell'UE istituiscano sistemi di controllo per gli impianti di riscaldamento e di condizionamento, che tutti i nuovi edifici siano a Energia Quasi Zero dalla fine del 2020 e che i Paesi dell'UE fissino requisiti minimi di rendimento energetico per i nuovi edifici e per le ristrutturazioni.

Il vulnus più grande della normativa riguarda la diversa attenzione posta al nuovo rispetto all'esistente. Se per la nuova costruzione i consumi energetici da fonte non rinnovabile sono praticamente banditi, in cambio l'intervento sull'esistente rischia spesso di essere escluso dai vincoli normativi, qualora non si tratti di "ristrutturazioni importanti", ossia *"quando i lavori in qualunque modo denominati (...) insistono su oltre il 25 per cento della superficie dell'involucro dell'intero edificio, comprensivo di tutte le unità immobiliari che lo costituiscono"*. Di fatto, in tal modo si escludono dall'applicazione della normativa tutte quelle trasformazioni funzionali, tipologiche e d'uso che costituiscono una quota preponderante delle attività di ristrutturazione del patrimonio edilizio (Cecere, 2012). Allo stesso tempo, il mercato delle nuove costruzioni in Italia è in forte crisi (ANCE, 2014), il che vanifica l'illusoria speranza che la virtù del "nuovo" possa bilanciare le mancanze della città "convenzionale" e ordinaria, in termini energetici.

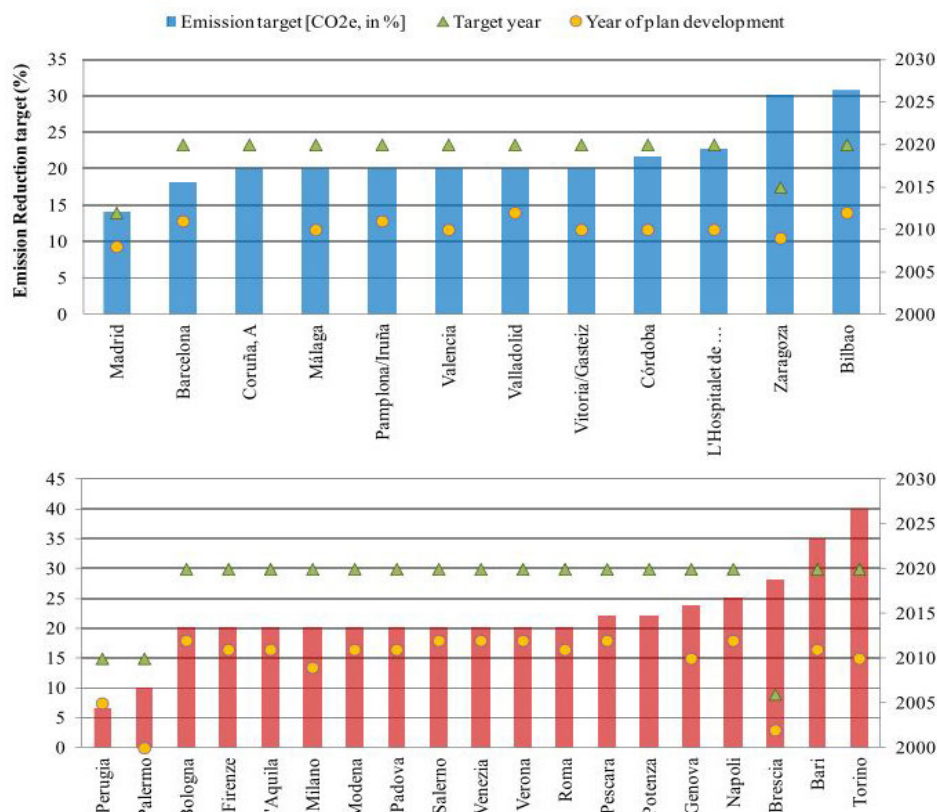
Una criticità ancora più grande per quanto riguarda l'intervento sull'esistente è che i modelli di calcolo della performance non consentono una valorizzazione delle peculiarità del clima e dell'architettura Mediterranea, in cui l'inerzia, il controllo della radiazione solare e la ventilazione naturale costituiscono elementi quantitativamente rilevanti del comportamento energetico globale. Ciò comporta in primo luogo una valutazione erronea del comportamento energetico, ma anche la diffusione di soluzioni progettuali "standard", quali l'incremento dell'isolamento e la riduzione delle infiltrazioni, che oltre ad essere inadeguate al contesto climatico e tipologico possono anche comportare una diminuzione del comfort, specialmente nella stagione estiva.

Gli strumenti normativi e di progetto che si sono susseguiti si sono pertanto rivelati inadeguati ad affrontare il problema della questione ambientale ed energetica. Il limite principale è l'oggetto di interesse, che risulta insufficiente ad incidere sui fenomeni che si instaurano a scala maggiore, quali l'interazione energetica tra gli edifici all'interno di un tessuto edilizio, la modificazione degli apporti energetici passivi nel contesto urbano o il fenomeno dell'isola di calore. Vi è una grande difficoltà degli strumenti normativi attuali nella possibilità di poter intervenire ad una scala maggiore rispetto a quella dell'edificio, che però risulta necessaria per una visione più ampia di governo dei fenomeni urbani e per un uso più consapevole e razionale delle risorse energetiche e naturali.

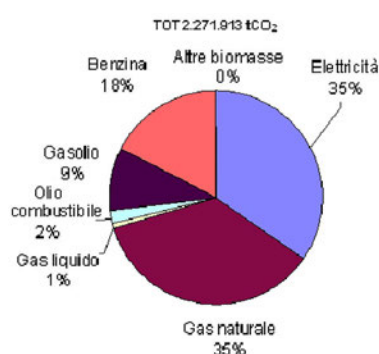
Un tentativo in questa direzione è rappresentato dall'iniziativa del "Patto dei sindaci" (Covenant of the Mayors). Aderendo al Patto su base volontaria, gli enti locali si impegnano formalmente a raggiungere e superare l'obiettivo europeo di riduzione del 20% delle emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto al 1990 entro l'anno target del 2020, attraverso misure volte ad incrementare l'efficienza energetica e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili nei loro territori. Lo strumento di attuazione di tale impegno è il PAES – Piano di azione per l'energia sostenibile. In questo caso tra i Paesi i cui comuni hanno deciso di aderire al patto, l'Italia rappresenta un'eccezione positiva. In Italia, 3,101 comuni (38% del totale italiano) hanno aderito al patto, 2,543 (82%) hanno redatto il PAES, anche se solo 255 (8%) sono già nella fase di monitoraggio dei risultati (De Gregorio Hurtado, 2015).

La positività di questa iniziativa risiede in due caratteristiche che potrebbero consentire il superamento dei limiti delle normative sul risparmio energetico nell'edilizia. In primo luogo l'attuazione del PAES richiede una preventiva valutazione delle emissioni effettivamente prodotte nel territorio del Comune, attraverso la realizzazione di un "Inventario di Base delle Emissioni" che costituisce il riferimento per il monitoraggio degli obiettivi raggiunti attraverso la progressiva attuazione delle misure previste. Il secondo aspetto positivo riguarda la scala di interesse del piano. Alla scala comunale e locale è possibile applicare le strategie di risparmio energetico che meglio si adattano al contesto geografico, climatico e morfologico, analizzando la condizione di partenza ad una scala maggiore rispetto al singolo edificio.

Purtroppo anche nel caso dei PAES le misure/azioni previste per l'intervento nel settore edi-



**Figura 33** Livelli di riduzione delle emissioni fissati in diverse città Italiane e Spagnole, Fonte: De Gregorio Hurtado, 2015



**Figura 34** Proportione per settore delle emissioni del Comune di Genova. Fonte: PAES del Comune di Genova

lizio possono definirsi ancora “ordinarie” (in figura 35, le azioni per il PAES del Comune di Genova). Le soluzioni proposte sono ancora fondate su una logica di intervento sul singolo edificio, in assenza di una valutazione della performance energetica e climatica locale.

Quello che tutt'ora manca per la definizione di linee guida efficaci sono strumenti di valutazione dei fenomeni fisici ed energetiche che si instaurano alla scala locale, in funzione della morfologia e della tipologia dell'edificato presente, che possano supportare le scelte di pianificazione urbana rispetto alla localizzazione e alle modalità di intervento più urgenti, efficaci ed adeguate.

Manca pertanto un'effettiva integrazione delle conoscenze in materia di climatologia, meteorologia, energetica, architettura e pianificazione, quando invece appare sempre più evidente come “l'efficacia del processo di trasformazione energetica risieda soprattutto nell'interpretare, per mezzo di adeguate scale di riferimento, la complessità delle relazioni tra i fenomeni che si vengono ad instaurare nei sistemi urbani” (Cecere et al., 2012).

L'integrazione di questo tipo di conoscenze, e la loro rilevazione, è senza dubbio di piena competenza del mondo dell'architettura e della progettazione e costituisce il presupposto alla base del presente lavoro di ricerca.

Si ritiene infatti fondamentale lo studio dei fenomeni energetici che si instaurano alla scala del tessuto urbano, che tiene in conto delle relazioni in cui è inserito il singolo edificio e ne permette l'analisi e la comprensione al fine di una corretta caratterizzazione del comportamento energetico e della predisposizione di strumenti speditivi di analisi che consentano l'operatività delle scelte.

Conoscere il comportamento energetico alla scala del tessuto urbano permette infatti l'individuazione di strategie di intervento decisamente più efficaci in termini di risultati prodotti rispetto alla pratica del “caso per caso”. A tal fine occorre in primo luogo analizzare la consistenza fisica dell'edificato, nelle sue caratteristiche morfologiche e di densità che, direttamente o indirettamente, determinano la performance energetica a scala urbana.

La comprensione delle relazioni tra i parametri morfologici e la performance climatica ed energetica consente la costruzione di mappe di vulnerabilità del patrimonio edilizio e atlanti energetici urbani, che permettono una comprensione del comportamento del sistema globale e consentono una programmazione consapevole, differenziata ed efficace degli interventi.

Un riferimento stimolante in tale direzione è l'atlante energetico redatto per la città di Amsterdam (Boogert et al 2014) in cui alle caratteristiche di consistenza fisica della città si associa anche il comportamento energetico differenziato nel territorio urbano, così come le potenzialità di miglioramento.

Lo studio dei fenomeni energetici alla scala di tessuto costituisce pertanto un avanzamento sia rispetto alle possibilità di miglioramento dei singoli edifici, sia per una comprensione e ottimizzazione del comportamento globale del sistema. Per tale motivo il lavoro di ricerca è incentrato su una scala di analisi locale, che permette l'integrazione di conoscenze proprie dell'organismo edilizio e delle sue aggregazioni con le conseguenze climatiche ed energetiche a scala locale e urbana.

Il presente lavoro contribuisce alla costruzione di un corpo di conoscenze inter-disciplinare e multiscalare del comportamento fisico dell'edificato nel contesto urbano, affinché la modellazione del clima, così come del comportamento termico dell'edificato, possano tradursi in strumenti speditivi di analisi del comportamento energetico di intere porzioni di città, che possano guidare il progetto e la pianificazione verso soluzioni effettivamente sostenibili su larga scala.



- Alexander, E. R., Reed, K. D., & Murphy, P. (1988). Density Measures and Their Relation to Urban Form. *Center for Architecture and Urban Planning Research Books*, Book 37.
- ANCE. (2014). Osservatorio congiunturale sull'industria delle costruzioni.
- APUR- Atelier Parisien d'Urbanisme. (2012). Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris. Retrieved from [http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot\\_chaleur\\_urbains\\_paris\\_cahier1.pdf](http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf)
- Beckers, B. (2012). *Solar Energy at Urban Scale*. ISTE-John Wiley.
- Beckers, B. (2016). Computational Methods for Solids and Fluids: Multiscale Analysis, Probability Aspects and Model Reduction. In A. Ibrahimbegovic (Ed.), (pp. 1–27). Cham: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-27996-1\_1
- Boogert, G. den, Hakvoort, L., Heit, R., Fèvre, S. Le, Lemmens, B., Mantel, B., ... Vries, B. de. (2014). Energy Atlas. Amsterdam Southeast. City of Amsterdam. Retrieved from <https://www.amsterdam.nl/wonen-leefomgeving/duurzaam-amsterdam/energie-atlas-brengt/>
- Bouwman. (2000). Changing mobility patterns in a compact city: environmental impacts. In G. de Roo & D. Miller (Eds.), *Compact cities and sustainable urban development. A critical assessment of policies and plans from an international perspective* (pp. 229 – 240). Aldershot UK: Ashgate Publishing.
- Burchell, R. W., Shad, N. A., Listokin, D., & Phillips, H. (1998). *The costs of sprawl--revisited*. TCRP Report 39. Washington, D.C.: National Academy Press.
- Burdett, R., & Sudjic, D. (2007). *The endless city - Urban age project*. (R. Burdett & D. Sudjic, Eds.). Phaidon Press.
- Bussadori, V. (2013). La pianificazione come strumento di adattamento ai cambi climatici. In F. Musco & E. Zanchini (Eds.), *Il Clima Cambia le Città: Conferenza sull'adattamento climatico in ambito urbano* (p. 20). Corila, Venezia: e-book. Retrieved from <http://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/ebook.pdf>
- Butera, F. M. (2004). *Dalla caverna alla casa ecologica. Storia del comfort e dell'energia*. Milano: Edizioni Ambiente srl.
- Cardinale, N., Francese, D., & Ruggiero, F. (2001). Bio-Climatic Technologies in Mediterranean Countries. In N. Maiellaro (Ed.), *Towards sustainable building* (pp. 59–76). Springer - GeoJournal Library.
- Cecere, C., Coch, H., Morganti, M., & Clementella, G. (2012). Dalla Riquilificazione Energetica al Recupero Sostenibile. In *BO Ricerche E Progetti per Il Territorio, La Città E L'architettura*, 3(5).
- Coch Roura, H., & Serra Florensa, R. (1995). *Arquitectura y energía natural* (I.). Barcelona: Edicions UPC.
- Coch, H. (1998). Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2(1-2), 67–87. doi:10.1016/S1364-0321(98)00012-4
- Commissione Europea. (2009). *L'adattamento ai cambiamenti climatici - White Paper*.
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., ... Perini, L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 98(3), 390–399. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.009>
- Cornoldi, A., & Los, S. (1982). *Habitat y Energía*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Curreli, A., & Coch, H. (2010). Solar access in the compact city: a study case in Barcelona. In *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. "PALENC 2010"* (pp. 1–11). Rhodes Island
- De Gregorio Hurtado, S., Olazabal, M., Salvia, M., Pietrapertosa, F., Olazabal, E., Geneletti, D., ... Reckien, D. (2015). Understanding how and why cities engage with climate policy. An analysis of local climate action in Spain and Italy.

- Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(8 (Special Issue ECCA 2015)), 23–46.
- De Pascali, P. (2008). Città ed energia: la valenza energetica dell'organizzazione insediativa. Milano: Franco Angeli.
- Downs, A. (1999). Some Realities about Sprawl and Urban Decline. *Housing Policy Debate*, 10(4), 955–974. doi:10.1080/10511482.1999.9521356
- European Commission. (2010). *Energy 2020: a strategy for competitive, sustainable and secure energy*.
- European Commission. (2013). An EU Strategy on adaptation to climate change.
- European Environment Agency. (2012). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: an indicator-based report. Report*.
- Eurostat. (2012). Eurostat Statistical Analysis, retrieved from: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistical-atlas/gis/viewer/>
- Fernández, J. E. (2014). Urban metabolism and city typologies. In *2014 MIT Europe Conference*. Brussels. Retrieved from <http://ilp.mit.edu/images/conferences/2014/brussels/presentations/Fernandez.2014.Brussels.pdf>
- Givoni, B. (1994). Building design principles for hot humid regions. *Renewable Energy*, 5, 908–916.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465.
- Higuera, E. (2006). *Urbanismo Bioclimatico*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Holden, E., & Norland, I. T. (2005). Three Challenges for the Compact City as a Sustainable Urban Form : Household Consumption of Energy and Transport in Eight Residential Areas in the Greater Oslo Region. *Urban Studies*, 42(12), 2145–2166.
- ISPRA. (2014). *Kyoto , ci siamo quasi*. Comunicato stampa.
- ISPRA. (2015). *Il consumo di suolo in Italia*. Edizione 2015.
- ISTAT. (2012). *Le problematiche connesse al consumo del suolo* Audizione del Presidente dell'Istituto nazionale di statistica Enrico Giovannini.
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American cities*. New York: Random House.
- Jenks, M., Burton, E., & Katie Williams. (1996). *The compact city: a sustainable urban form?* London: Spon Press.
- Knowles, R. L. (1974). *Energy and form: an ecological approach to urban growth*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Los, S. (2007). *Città solari: dal passato al futuro*. *luav Giornale Dell'università*, 42.
- Ministero dell'Ambiente. (2013). *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*.
- Ministero dell'ambiente. (2014). *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti , vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*. Roma.
- Morganti, M., Coch, H., & Cecere, C. (2012). The effect of urban obstruction in Mediterranean climates: built form typology, density and energy. *Architecture, City and Environment*, 19, 13–26.
- Neuman, M. (2005). The Compact City Fallacy. *Journal of Planning Education and Research*, 25(1), 11–26. doi:10.1177/0739456X04270466
- OECD Green Growth Studies. (2012). *Compact City Policies: A Comparative Assessment*. Paris: OECD Publishing.
- Olgyay, V. (1963). *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton, N.J: Princeton University Press.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- Pont, M. B., & Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*. Rotterdam, Netherlands: NAI Publishers.



- Pont, M. B., & Haupt, P. (2009). *Space, Density and Urban Form*. PhD, Technische Universiteit Delft. doi:10.2105/AJPH.94.9.1518
- Population Reference Bureau. (2015). Urban population. Retrieved from [www.prb.org](http://www.prb.org)
- World Bank. (2014). World DataBank. Retrieved from [databank.worldbank.org/data/home.aspx](http://databank.worldbank.org/data/home.aspx)
- Real Estate Research Corporation. (1974). *The cost of sprawl: environmental and economic costs of alternative residential development patterns at the urban fringe*. Washington: U.S. Government Printing Office
- Rogora, A. (2013). Un approccio bioclimatico alla trasformazione della città. In *Biourbanistica energia e pianificazione a Faenza*. Faenza: Valfrido Edizioni.
- Rogora, A., & Dessì, V. (2005). *Il Comfort Ambientale Degli Spazi Aperti*. EdicomEdizioni.
- Serra, R. (1999). *arquitectura y climas* (I.). Barcelona: Gustavo Gili, SA.
- Sertorio, L. (2002). *Storia dell'abbondanza*. Bollati Boringhieri.
- Stiles, R., Wawrytko, B. G., Hagen, K., Trimmel, H., Loibl, W., Köstl, M., ... Feilmayr, W. (2014). *Urban Fabric Types and Microclimate Response -Assessment and Design Improvement . Final Report*. Vienna.
- Tombolini, I., Zambon, I., Ippolito, A., Grigoriadis, S., Serra, P., & Salvati, L. (2015). Revisiting "Southern" Sprawl: Urban Growth, Socio-Spatial Structure and the Influence of Local Economic Contexts. *Economies*, 3(4), 237–259. doi:10.3390/economies3040237
- UNEP. (2004). Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. *Environment Alert Bulletin*, (August), 4.
- United Nations. (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. United Nations, New York*.
- Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J. C., & Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health*, 94(9), 1518–1520.



# ISOLA DI CALORE, MORFOLOGIA URBANA E DOMANDA ENERGETICA

L'isola di calore è probabilmente il fenomeno più evidente, studiato e documentato delle alterazioni climatiche indotte, e non volute, dall'uomo (Oke 1987). Il processo di urbanizzazione produce cambiamenti radicali nella natura delle superfici e nei processi di interscambio energetico con l'atmosfera, trasformando l'ambiente urbano in un grande accumulatore di calore rispetto alle aree rurali.

L'effetto dell'isola di calore si somma ai cambiamenti climatici globali e ad eventi meteorologici estremi quali le "onde di calore", aggravando i rischi per la salute dei cittadini ed incidendo in maniera rilevante sui consumi energetici durante la stagione estiva. In questo periodo il fenomeno risulta particolarmente critico e determina un circolo vizioso, per cui ad un incremento delle temperature urbane corrisponde un maggior consumo energetico per la climatizzazione, che attraverso il calore di scarto immesso in atmosfera a sua volta contribuisce all'innalzamento delle temperature.

Il presente capitolo raccoglie lo stato delle conoscenze sulle cause e le conseguenze energetiche del fenomeno dell'isola di calore rispetto al contesto Mediterraneo, con particolare attenzione agli studi sulla relazione tra la morfologia urbana, l'isola di calore e le prestazioni energetiche.

Tra le cause che concorrono alla formazione dell'isola di calore un contributo significativo è infatti dato dai processi meccanici e radiativi che si instaurano tra gli edifici, in funzione della loro morfologia e densità.

La morfologia urbana rappresenta dunque una variabile fondamentale per la valutazione della performance energetica a scala urbana, in quanto contribuisce a modificare il clima locale e gli apporti energetici passivi per l'edificato.

Tuttavia gli studi sinora condotti tendono ad analizzare i due contributi separatamente: le ricerche che si concentrano sulle conseguenze energetiche dovute all'isola di calore non considerano la modificazione degli apporti solari per gli edifici nel contesto urbano; viceversa, quelle che analizzano la performance energetica in funzione della morfologia urbana non considerano le conseguenze dovute alla presenza dell'isola di calore.

La maggior parte degli studi presentati trattano però la relazione tra morfologia urbana, energia e clima alla stessa scala di analisi, vale a dire alla scala locale dei tessuti edilizi. I caratteri morfologici dell'edificato hanno infatti un forte impatto sul consumo energetico urbano e, allo stesso tempo, una predisposizione alla trasformazione molto bassa. La struttura urbana e la proporzione dei vuoti sui pieni rappresentano gli elementi più persistenti a fronte del processo di trasformazione cui la città è continuamente sottoposta. Il loro impatto è dunque decisivo e persiste per un lasso di tempo decisamente maggiore rispetto agli adeguamenti tecnologici dei singoli edifici.

La ricerca si fonda su questa assunzione e pertanto gli studi presentati sono quelli ritenuti più utili per metodologia, strumenti e risultati conseguiti in questo specifico campo di indagine e che hanno contribuito alla definizione delle successive fasi del lavoro.

## 2.1 L'isola urbana di calore: il fenomeno e gli effetti

L'isola urbana di calore (UHI) è un fenomeno climatico indotto dalla presenza di un'area densamente urbanizzata che determina un incremento delle temperature nelle aree urbane rispetto alle aree rurali limitrofe.

Le prime prove dell'evidenza del fenomeno si devono a Luke Howard (1833), che è considerato il pioniere degli studi sul clima urbano. Howard fu forse il primo a rilevare e documentare la **modificazione locale del clima indotta dalla presenza di un'area urbana, analizzando dati di temperatura dell'aria nella città di Londra relativi al periodo 1806 ed il 1830**. I suoi meriti sono riconosciuti da Chandler (1965), che ben più tardi conferma l'esistenza di una differenza di temperatura tra il centro di Londra e le aree più periferiche, così come tra più stazioni posizionate in diversi punti della città. Si deve però a Oke la **teorizzazione fisica del fenomeno dell'isola di calore e la formulazione delle cause e delle caratteristiche urbane e meteorologiche che ne influenzano l'andamento spaziale e temporale** (Oke 1987).

Negli ultimi 20 anni l'innalzamento delle temperature nelle aree urbane è stato ampiamente documentato, attraverso campagne di misurazione volte a comparare i dati climatici tra il centro della città e le aree rurali circostanti. Secondo Oke, la differenza annuale media di temperatura, per una città di circa 1mln di abitanti, varia tra 1°C e 3°C (Oke 1987). Studi più recenti mostrano una variabilità del fenomeno tra 1°C e 10°C circa in diverse città nel mondo (Dorer & Allegrini 2012).

Le conseguenze principali del surriscaldamento delle aree urbane riguardano stress termici e **pericoli per la salute dei cittadini e l'incremento dei consumi energetici degli edifici** (Oke 1987; Rosenfeld et al. 1995; Santamouris et al. 2001; Grimmond et al. 2010), sebbene in climi freddi il fenomeno produca anche un beneficio durante la stagione invernale (Hacker et al. 2005).

Al contrario, in climi caldi quale quello Mediterraneo, l'isola di calore ha un impatto rilevante sul consumo energetico a scala urbana, gravando sulla domanda di climatizzazione estiva e diminuendo considerevolmente il potenziale di raffreddamento delle tecniche di ventilazione naturale durante la notte (Oke 1988). L'isola di calore contribuisce pertanto ad innalzare il consumo già alto di energia elettrica, incrementando l'utilizzo dei sistemi di climatizzazione meccanizzata (Santamouris 2014b; Bueno 2012; Kolokotroni et al. 2012; Kolokotroni et al. 2006). Allo stesso tempo, l'impiego massivo dei sistemi di aria condizionata contribuisce all'amplificazione del fenomeno, a causa del calore di scarto che le macchine frigorifere immettono in atmosfera. Tale circolo vizioso oltre ad aggravare l'impatto del costruito sull'ambiente incide negativamente sull'approvvigionamento energetico, comportando una richiesta di energia elettrica che può compromettere il regolare funzionamento delle reti di distribuzione (Zachariadis & Hadjinicolaou 2014).

Negli ultimi anni la crescita in intensità del fenomeno insieme all'aumento della popolazione nelle grandi città e alla maggiore frequenza delle "onde di calore" ha incrementato in modo significativo il numero di decessi dovuti al caldo nelle aree urbane, soprattutto nel sud dell'Europa dove si rilevano generalmente temperature più alte e un tasso di anzianità maggiore della popolazione (de Wilde & Coley 2012; Moonen et al. 2012). Stando a studi epidemiologici, vivere in città comporta un rischio più elevato di mortalità, proprio a causa della presenza di temperature maggiori (Conti et al. 2005). Inoltre l'innalzamento delle temperature determina un incremento della concentrazione di ozono ad altezza pedonale ed un peggioramento della qualità dell'aria che influisce sull'incidenza di malattie di tipo respiratorio (Rosenfeld et al. 1998).

Va però evidenziato che l'impatto dell'UHI sul comfort e sulla salute degli abitanti, così come

sul consumo energetico, può essere sostanzialmente differente in diverse regioni climatiche e può anche differire, nella medesima regione, al variare della stagione estiva o invernale (Givoni 1998). Per una corretta valutazione dell'entità del fenomeno e delle sue conseguenze occorre pertanto un'analisi dettagliata della distribuzione annuale e giornaliera delle temperature urbane nello specifico sito di analisi.

### 2.1.1. Entità del fenomeno nell'area mediterranea

Nel corso degli ultimi 30 anni sono stati condotti numerosi studi sull'isola di calore in città perlopiù nordamericane, europee ed asiatiche (Kolokotroni & Giridharan 2008; Rotach et al. 2005; APUR 2012; Houet & Pigeon 2011; Zoulia et al. 2009; Grimmond et al. 2010; Konopacki & Akbari 2000; Hirano & Fujita 2012; Jusuf & Hien 2007; Dorer & Allegrini 2012). Le campagne di misurazione più accurate e citate riguardano le città di Basilea, con il progetto BUBBLE (Rotach et al. 2005) e Tolosa con l'esperimento CAPITOUL (Masson et al. 2008).

Per quanto riguarda l'area del Mediterraneo si riportano di seguito i risultati più significativi, organizzati per area geografica di appartenenza.

**Grecia:** Per la Grecia sono disponibili diversi studi sull'UHI. L'isola di calore di Atene e le ripercussioni sul consumo energetico estivo sono stati ampiamente investigati da Santamouris (2001, 2007). Sulla base di una estensiva campagna di misurazione (30 stazioni meteorologiche urbane e suburbane) l'autore ha individuato un'isola di calore giornaliera massima che raggiunge 15°C nell'area centrale della città e 10°C nella maggior parte delle stazioni urbane. Nell'area suburbana l'intensità massima del fenomeno risulta invece molto più contenuta, tra i 2°C e i 5°C a seconda delle caratteristiche della stazione.

Più recentemente un ulteriore studio sulla città di Atene, riporta un'intensità media massima mensile di UHI di 5°C, evidenziando inoltre differenze di temperatura significativa tra le varie aree all'interno della città (Giannopoulou et al. 2011).

Kolokotsa et al. (2009) analizzano l'isola di calore di Hania, una città piccola ma densamente costruita dell'isola di Creta. Lo studio si basa su dati di 9 stazioni meteorologiche urbane e tre rurali ed ha individuato un'isola di calore media massima di 8°C per la città.

Giannaros e Melas (2012) analizzano invece l'isola di calore nella città costiera di Thessaloniki, mediante dati di una campagna di misurazione annuale in 7 punti all'interno della città. L'isola di calore massima nella città greca si presenta in estate, con un'intensità media tra i 2°C e i 4°C, mentre in inverno risulta inferiore, tra 1°C e 3°C.

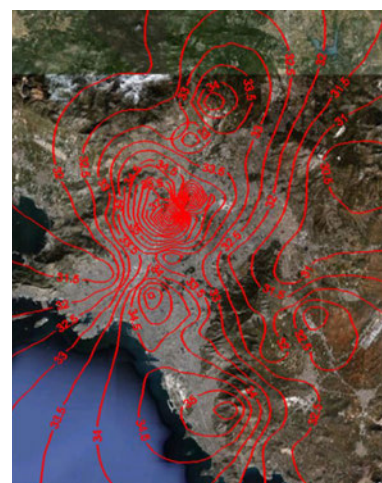
Un ulteriore studio del 2012 riporta l'intensità di UHI per la città di Volos (Papanastasiou & Kitas 2012). Attraverso dati di temperature misurati presso 4 stazioni meteorologiche (2 urbane e 2 rurali) l'intensità media massima di UHI risulta di circa 2°C, con un'intensità massima di 3.4°C in inverno e 3,1°C in estate.

**Italia:** In Italia sono stati condotti diversi studi su Roma. Negli anni '80 Colacino e Lavagnini pubblicano i primi risultati sull'isola di calore nella capitale, analizzando dati meteorologici urbani e rurali relativi a 12 anni di osservazioni (1964–1975). Rispetto alle temperature minime, l'area urbana risulta mediamente più calda delle zone rurali di 2.5°C in inverno e 4,3°C in estate.

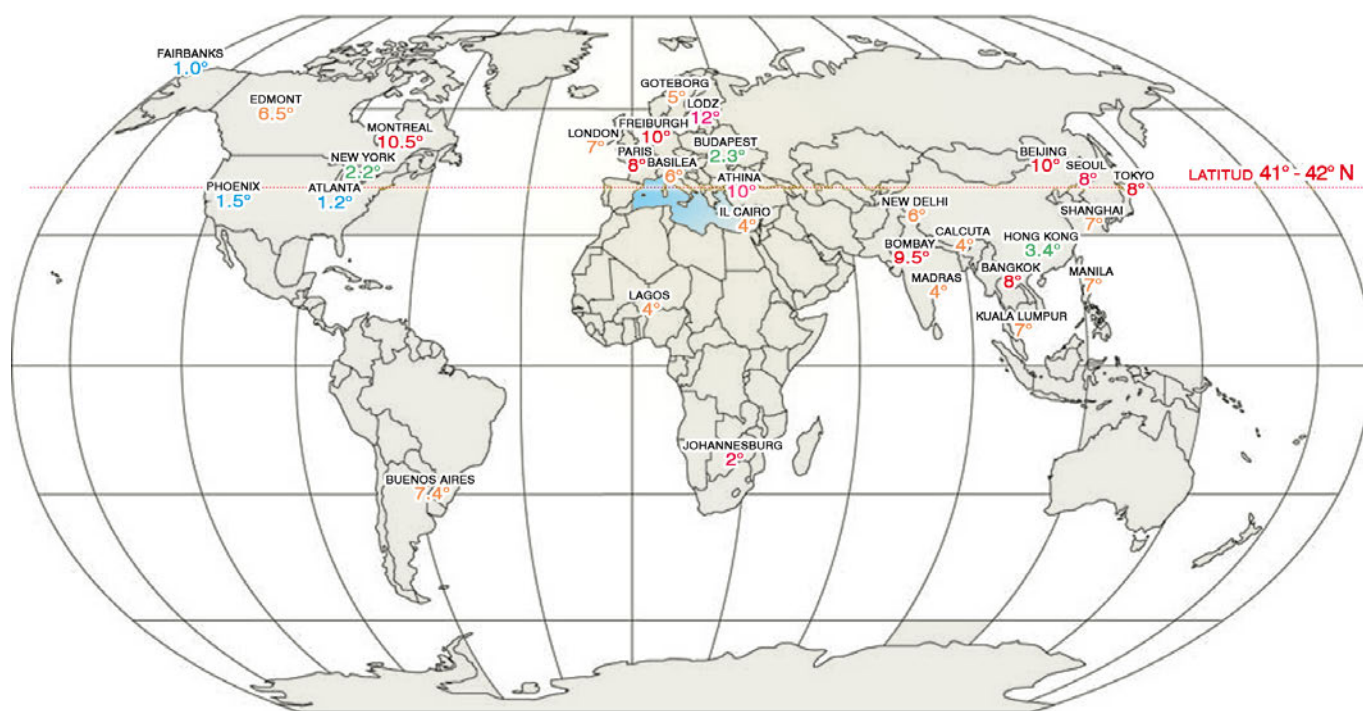
Più recentemente Bonacquisti et al. (2006) rilevano un'intensità media dell'isola di calore di 3°C, con un massimo estivo di 4,2°C ad agosto.

Infine Fabrizi et al. (2010), sulla base di dati di stazioni meteorologiche e immagini satellitari confermano un incremento delle temperature compreso tra i 3K e i 4K durante la notte.

L'isola di calore è stata studiata anche a Firenze, attraverso misurazioni in 21 siti all'interno della città durante l'estate del 2007 (Pietralli et al. 2008). Per la città toscana l'incremento me-



**Figura 35** Distribuzione della temperatura media massima mensile ad Atene nel mese di agosto. Fonte: Giannopoulou et al. 2011



**Figura 36** Risultati delle principali campagne di misurazione dell'isola di calore in diverse città del mondo. Fonte: elaborazione personale sulla base della review di Dorer & Allegrini 2012.

#### Campagne di misurazione dell'isola di calore

	Intensità UHI °C
<b>AMERICA</b>	
Atlanta, USA	1.2
Edmonton, Canada	6.5
Fairbanks, USA	1
Montreal, Canada	10.5
New York City, USA	2.2
Phoenix, USA	1.5
<b>ASIA</b>	
Bangkok, Thailandia	8
Beijing, Cina	10
Bombay, India	9.5
Calcutta, India	4
Ho Chi Minh, Vietnam	5
Hong Kong, Cina	3.4
Kuala Lumpur, Malesia	7
Madras, India	4
Manila, Filippine	7
New Delhi, India	6
Pyongyang, Corea del Nord	4
Seoul, Corea del Sud	8
Shanghai, Cina	7
Tokyo, Giappone	8
<b>AFRICA</b>	
Cairo, Egitto	4
Johannesburg, Sudafrica	2
Lagos, Nigeria	4
<b>SUD AMERICA</b>	
Buenos Aires, Argentina	7.4
<b>EUROPA</b>	
Atene, Grecia	10
Basel, Svizzera	6
Biel, Svizzera	5
Budapest, Ungheria	2.3
Freiburg, Germania	10
Fribourg, Svizzera	5
Goteborg, Svezia	5
Lodz, Polonia	12
London, Inghilterra	7
Paris, Francia	8
Zurich, Svizzera	7

**Tabella 2** Intensità media dell'isola di calore, sulla base della review di Dorer & Allegrini 2012.



dio delle temperature urbane varia tra 3.0°C e 3.9°C rispetto alle minime e tra 2.6°C e 3.1°C rispetto alle temperature medie.

**Spagna:** Per la Spagna occorre menzionare il lavoro di Moreno-Garcia per la città di Barcellona (Carreras et al. 1990; Moreno-Garcia 1994), che attraverso dati raccolti presso stazioni meteorologiche fisse e rilevazioni mobili all'interno della città individua un'isola di calore media di 1.4°C (2.9°C rispetto alle minime), con un massimo di intensità che raggiunge 9°C. Più recentemente sono stati pubblicati diversi studi, numerici e sperimentali, sulla città di Madrid (Salamanca et al. 2012; Sobrino et al. 2013).

**Portogallo:** In Portogallo Alcoforado e Andrade (2006) presentano una review dei precedenti studi sull'isola di calore per la città di Lisbona, individuando un'isola di calore media notturna di 2.5°C sia in inverno che in estate.

**Turchia:** Karaca et al (1995) studiano l'isola di calore derivante dall'urbanizzazione delle aree di Ankara e Istanbul, analizzando serie storiche di temperatura per le due città. Gli autori individuando una differenza media tra le aree urbanizzate e le aree rurali di 2°C ed un incremento del fenomeno negli anni più recenti. Negli stessi anni Tayanc and Toros (1997) studiano l'isola di calore delle quattro città più grandi della Turchia dopo Ankara ed Istanbul, rilevando un'intensità massima del fenomeno tra 6.5°C e 9°C.

**Algeria:** Uno studio interessante è stato realizzato da Bourbia e Boucheriba (2010) nella città di Costantina. I ricercatori analizzano la relazione tra la geometria dei canyon e le temperature urbane, attraverso misurazioni *in situ* durante il periodo estivo. I risultati mostrano una differenza di temperatura compresa tra 3°C e 6°C tra la città e l'intorno rurale, con differenze significative della temperatura urbana in funzione della geometria del canyon.

**Israele:** Infine occorre menzionare uno studio svolto a Tel Aviv utilizzando misurazioni di temperatura sia alla quota dei tetti che al livello della strada (Saaroni et al. 2000). Le temperature misurate alla quota dei tetti rilevano una differenza media di temperature tra il centro e la periferia della città compresa tra 1.2°C di giorno e 2.5°C di notte. A livello della strada, invece, l'isola di calore è più evidente, con un'intensità tra i 3°C e i 5°C. Tale differenza dipende dalla presenza della brezza marina che di notte contribuisce a mitigare le temperature al livello dei tetti, ma non ha lo stesso effetto benefico nella canopia urbana, dove la velocità del vento è fortemente ridotta.

La revisione di letteratura sull'isola di calore nel contesto Mediterraneo individua pertanto un'isola di calore variabile tra poco più di 1°C e fino a 15°C, a seconda della città, della stagione, del periodo della giornata e della metodologia di rilevazione. Va rilevato che, sia per il carattere empirico della ricerca, sia per una diffusa carenza di informazioni atte a valutare la qualità del lavoro svolto, non è possibile comparare adeguatamente i risultati di tali studi e pertanto non è possibile trarre conclusioni generali per l'area Mediterranea.



### 2.1.2. Clima urbano: scale di analisi e bilancio energetico

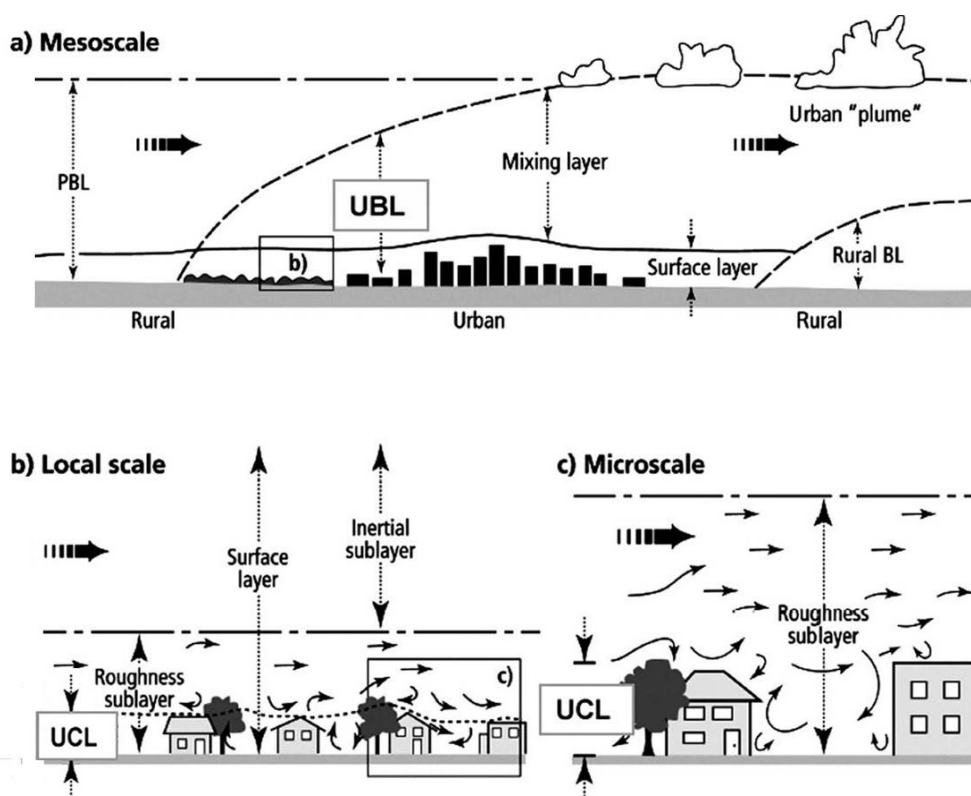
L'UHI è il risultato dell'interazione tra atmosfera, radiazione solare e caratteristiche morfologiche, materiche e di natura antropogenica presenti in tutte le aree urbanizzate. L'interazione tra superficie terrestre e atmosfera determina la nascita di fenomeni diversi a seconda della scala orizzontale e verticale di analisi. Nell'ambito della climatologia urbana si individuano 4 scale spaziali di riferimento (Oke 1987):

La **Macroscala**, che varia in un diametro compreso tra  $10^5$  e  $10^8$  m, è utile a caratterizzare il clima, nelle sue caratteristiche medie, per una vasta regione.

La **Mesoscala**, compresa tra  $10^4$  e  $2 \times 10^5$  m, è una scala principalmente urbana e regionale, utile a valutare le modificazioni indotte da vaste aree urbanizzate sul clima di un territorio.

La **Scala Locale**, compresa tra  $10^2$  e  $5 \times 10^4$  m, è la scala utile a caratterizzare il clima nelle differenti aree di una città, in funzione delle caratteristiche dell'edificio, dei suoli e dell'attività prevalente. A tale scala si approfondisce lo studio del movimento dell'aria, il bilancio di radiazione ad onda lunga e corta e dell'umidità che influiscono sulla temperatura dell'aria nello strato di atmosfera al di sopra dell'altezza media degli edifici (substrato di rugosità - *roughness sublayer*- figura 37). Le stazioni meteorologiche urbane sono atte a monitorare la suddetta scala locale e forniscono osservazioni che risentono delle caratteristiche antropiche e topografiche dell'area di riferimento. Per tale motivo risultano adeguate per la descrizione del clima urbano di quartieri con caratteristiche omogenee per quanto riguarda i materiali utilizzati e la proporzione di superfici permeabili e non permeabili, la morfologia e la densità dell'edificio e l'attività prevalente (Oke 2006).

La **Microscala**, tra  $10^{-2}$  e  $10^3$  m, è una scala di dettaglio, utile a valutare la variazione delle



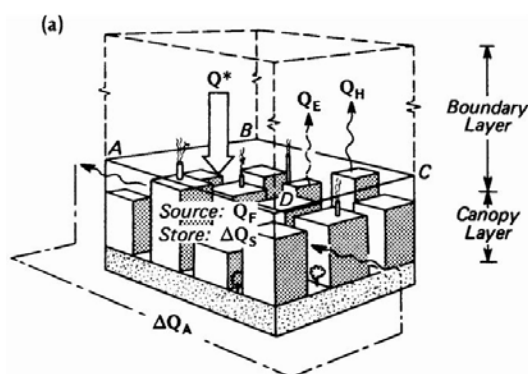
**Figura 37** Scale climatiche: Mesoscala, scala locale e microscala. Fonte: Oke 1987

temperature superficiali ed il microclima di uno specifico spazio urbano, dal livello della strada fino all'altezza media degli edifici (Urban Canopy Layer - UCL- figura 37). Alla microscala è possibile valutare come ciascuna superficie o oggetto determini uno specifico microclima nelle proprie immediate vicinanze, valutare i gradienti di temperatura che si instaurano nello strato di atmosfera in più stretto contatto con la superficie terrestre e la perturbazione indotta nella circolazione dell'aria da elementi anche di dettaglio. Le temperature dell'aria e delle superfici possono infatti variare di diversi gradi in distanze molto ravvicinate ed il movimento dell'aria può essere sensibilmente perturbato anche dalla presenza di piccoli ostacoli (Oke 2006). Approfondimenti tipici a questa scala di analisi riguardano lo studio del microclima proprio di un edificio, di superfici alberate, strade, corti, giardini etc.

Lo studio della distribuzione spaziale della temperatura in ambito urbano si avvale spesso del modello del "canyon urbano". Il canyon urbano rappresenta una porzione astratta dello spazio costituito da due edifici prospicienti, di cui si considerano solo le pareti contrapposte, e la strada tra essi compresa. Il volume di aria racchiuso tra le superfici verticali degli edifici contrapposti, la strada ed una superficie immaginaria alla quota dell'altezza dei tetti, costituisce il volume di controllo su cui calcolare il bilancio energetico e le variazioni di temperatura.

Il bilancio energetico per un canyon urbano, definito da Oke (Oke 1987), è utile a comprendere come vari in modo sostanziale il microclima nella canopia urbana rispetto ad un'area rurale. Per un volume di controllo, il bilancio energetico è espresso come:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A$$



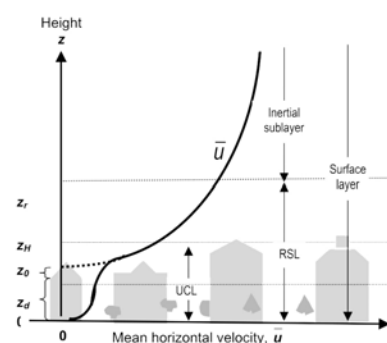
Dove  $Q^*$  rappresenta la radiazione netta alle superfici,  $Q_H$  e  $Q_E$  rispettivamente il calore sensibile e latente,  $Q_F$  rappresenta il calore antropogenico rilasciato nel volume di controllo,  $\Delta Q_A$  il trasferimento orizzontale netto di calore latente o sensibile attraverso le superfici laterali del volume e  $\Delta Q_S$  il calore immagazzinato da tutti gli elementi all'interno del volume di controllo, quali aria, vegetazione, edifici e suolo.

Il termine della radiazione netta alle superfici è a sua volta composto dal bilancio della radiazione ad onda corta e lunga:

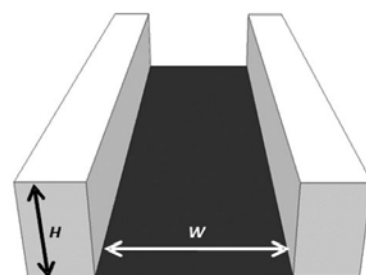
$$Q^* = K \uparrow + K \downarrow + L \uparrow + L \downarrow$$

Con  $k \downarrow$  radiazioni onda corta incidente,  $K \uparrow$  la radiazione a onda corta riflessa,  $L \downarrow$  la radiazione a onda lunga incidente e  $L \uparrow$  la radiazione a onda lunga emessa dalle superfici.

L'incremento delle temperature è pertanto causato dalla presenza di caratteristiche tipiche delle aree urbane che incidono sul bilancio energetico della città modificando il clima sotto ogni punto di vista: radiativo, termico, aerodinamico e igrometrico.



**Figura 38** Profilo della velocità del vento e scale verticali di riferimento in un'area densamente urbanizzata, Fonte: Oke 2006



**Figura 39** Schematizzazione dell'Urban Canyon. Fonte: Takebayashi & Masakazu 2012

**Figura 40** Bilancio energetico alle superfici del canyon. Fonte: Oke 1987

- Scarsità di vegetazione e predominanza di superfici impermeabili → Minore  $Q_E$
- Diffusività maggiore dei materiali urbani rispetto al contesto rurale → Maggiore  $\Delta Q_S$
- Valori bassi di albedo → Minore  $K \uparrow$
- Geometrie urbane che “intrappolano” la radiazione e ostacolano il vento → minore  $L \uparrow$ , maggiore  $K \downarrow$  e minore  $\Delta Q_A \uparrow$
- Alti livelli di sostanze inquinanti presenti in atmosfera → Maggiore  $L \downarrow$
- Riscaldamento e climatizzazione degli edifici e traffico veicolare → Maggiore  $Q_F$

Possiamo quindi affermare che le variabili urbane principali che concorrono alla formazione dell'UHI appartengono a tre categorie: la presenza di vegetazione, le caratteristiche termo-radiative dei materiali e la morfologia e densità dell'edificato.

Le cause che nel complesso generano l'isola di calore sono pertanto note, sebbene non sia chiara la predominanza di un rispetto alle altre. E' possibile individuare 7 processi termo-radiativi che determinano un comportamento energetico profondamente diverso in area urbana rispetto ad un ambiente rurale (Oke 1987; Grimmond et al. 2010):

- 1. Incremento di  $L \downarrow$ :** La radiazione a lunga incidente aumenta a causa dell'assorbimento della radiazione da parte delle sostanze inquinanti presenti in atmosfera e la successiva emissione verso la terra.
- 2. Decremento di  $L \uparrow$ :** Il processo di raffreddamento per irraggiamento delle superfici urbane è rallentato durante la notte, a causa della presenza di edifici in adiacenza che ostruiscono buona parte della volta celeste verso cui disperdere il calore (le superfici degli edifici, di notte, sono sempre calde per il calore accumulato durante il giorno e per effetto dei sistemi di riscaldamento).
- 3. Incremento o decremento di  $K^*$  ( $K \downarrow - K \uparrow$ ):** Il valore della radiazione netta è modificato in un contesto urbano a causa della morfologia degli edifici che in parte ostruiscono la radiazione solare incidente, ma allo stesso tempo determinano con la loro geometria una “trappola radiativa” (trapping radiativo), ovvero riflessioni multiple della radiazione tra le facciate degli edifici che nel complesso possono incrementare il valore di  $K^*$ .
- 4. Incremento di  $\Delta Q_S$ :** Il calore immagazzinato nel sistema è sostanzialmente maggiore in un contesto urbano, data la predominanza di materiali con bassi valori di diffusività (materiali da costruzione) e colori delle superfici che favoriscono l'assorbimento della radiazione (bassi valori di albedo)
- 5. presenza di calore antropogenico:** In città sono presenti fonti di calore non presenti in ambiente rurale (calore di scarto dei sistemi di climatizzazione degli edifici, traffico veicolare, industria, metabolismo umano)
- 6. Decremento  $Q_E \downarrow$ :** Il calore dissipato nel processo di evaporazione ed evapotraspirazione è fortemente ridotto in ambito urbano, a causa della prevalenza di superfici impermeabili, dei bassi valori di ritenuta delle acque e della scarsa presenza di vegetazione
- 7. Decremento di  $\Delta Q_A$ :** Infine il trasferimento orizzontale netto di calore latente o sensibile nel canyon è ridotto a causa della bassa velocità del vento nella canopia urbana.

Durante il giorno le cause 3, 4, 5 e 6 determinano un accumulo di calore sensibile nei canyon urbani; in seguito al tramonto le cause 2 e 7 ostacolano il raffreddamento degli edifici mantenendo temperature alte rispetto agli ambienti rurali.

La modificazione del bilancio energetico può determinare anche un decremento delle temperature rispetto ad un ambiente rurale, con la creazione della cosiddetta “Cool island”, specialmente durante le ore più assolate delle giornate estive. Ciò può succedere in conformazioni urbane costituite da canyon profondi e stretti, che determinano una superficie di calpestio praticamente sempre in ombra e quindi minori porzioni di superfici su cui incide la radiazione solare. Spesso tale effetto è però annullato dalla presenza di fonti antropogeniche, quali siste-

mi di aria condizionata o traffico veicolare.

### 2.1.3. Conseguenze energetiche a scala urbana

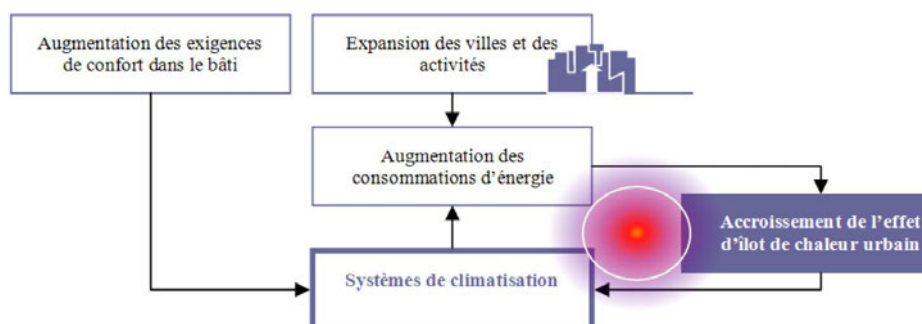
L'effetto dell'aumento delle temperature sulla domanda energetica dell'edificio è stato ampiamente trattato, soprattutto per quanto riguarda l'aumento dei consumi nel periodo estivo ed il rischio di sovraccarico delle reti di distribuzione nei giorni più caldi dell'anno (Moonen et al. 2012; Allegrini et al. 2012; Oxizidis et al. 2008; Magli et al. 2015; Giannaros & Melas 2012; de la Flor & Domínguez 2004; Hirano & Fujita 2012; Denes-Bejat et al. 2008; Bozonnet et al. 2009). Recentemente Santamouris (2014b) ha pubblicato una revisione della maggior parte di questi studi, individuando una variazione statisticamente significativa del consumo energetico degli edifici a causa dell'isola di calore, che determina un incremento medio dei consumi del 13% rispetto ad un ambiente rurale.

L'effetto dell'isola di calore comporta una variazione consistente della performance energetica sia in climi freddi che caldi ed influisce in maniera differente a seconda dei carichi interni e dell'attività prevalente negli edifici analizzati. Le tipologie più studiate sono gli uffici, caratterizzati da carichi interni elevati e grande consumo energetico per la climatizzazione e gli edifici residenziali, caratterizzati da un carico interno molto più basso ed una maggiore dipendenza dalle variazioni di temperatura esterna.

Studi sulle città degli Stati Uniti dimostrano che una percentuale tra il 5 e il 10% del carico massimo di potenza estiva dovuto alla climatizzazione degli ambienti è dovuto all'effetto dell'isola di calore (Akbari & Konopacki 2005).

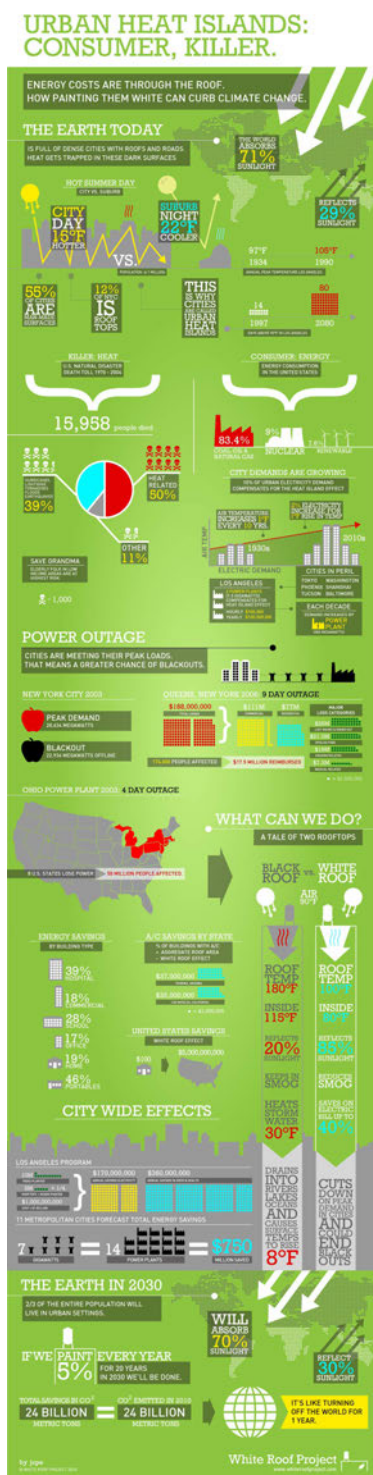
Santamouris ha studiato le conseguenze energetiche dell'isola di calore di Atene su un edificio per uffici (Santamouris et al. 2001). A fronte di un'intensità media massima di UHI di 10°C nelle aree centrali della città l'autore stima un incremento della potenza di picco estiva da 13.7kW a 27.5 kW a causa dell'isola di calore, considerando una temperatura di comfort indoor di 26°C. La riduzione della domanda energetica invernale viene invece stimata da 5.1 kWh/mq/mese per una localizzazione suburbana a 3.7 kWh/mq/mese per le aree urbane centrali. L'effetto sugli edifici residenziali è stato invece approfondito da Hassid (Hassid et al. 2000), che individua un incremento del 15-50% del carico estivo per gli edifici nell'area ovest di Atene in comparazione con la stima effettuata utilizzando dati climatici standard per la città.

Bueno et al. (Bueno et al. 2012) presentano un'analisi parametrica della variazione della domanda energetica in funzione di differenti gradi di aumento delle temperature urbane, utilizzando come riferimento i dati del progetto CAPTOUL (Tolosa). Lo studio riporta un incremento della domanda di raffrescamento per gli edifici residenziali del 5% per ogni grado di aumento delle temperature urbane rispetto a quelle rurali ed una riduzione del carico di riscaldamento nello stesso ordine di grandezza in presenza dell'isola di calore invernale. Al contrario gli edifici per uffici non risultano particolarmente influenzati dall'effetto dell'isola di calore. Gli au-



**Figura 41** Relazione tra consumo di energia e isola di calore, Fonte: Bozonnet 2008





**Figura 42** Risparmi energetici ed economici prefigurati da una campagna di sensibilizzazione per l'incremento dell'albedo delle coperture, "The white roof project" <http://www.whiteroofproject.org/>

tori giustificano tale risultato sottolineando che la domanda energetica di un edificio per uffici dipende in misura maggiore dai carichi interni, sia estivi che invernali, rispetto all'andamento della temperatura esterna.

Per il clima di Roma Fanchiotti e Zinzi (2012) stimano un incremento del carico estivo per un edificio residenziale fino al 57% in presenza di un'isola di calore massima di 4,5°C tra le aree urbane analizzate. Un ulteriore caso di studio italiano è stato condotto per la città di Modena (Magli et al. 2015) e mostra un risultato leggermente differente. L'effetto dell'isola di calore estiva ed invernale è stato valutato sulla performance energetica di un edificio universitario. In tal caso lo studio stima un incremento della domanda di raffrescamento del 10% rispetto ad un ambiente rurale, ma anche una diminuzione della domanda di riscaldamento del 15%, che consente una riduzione del consumo energetico annuo per l'edificio studiato pari al 2% in virtù dell'effetto dell'isola di calore.

Vari studi dimostrano che l'effetto dell'isola di calore comporta un incremento dei consumi anche in climi più freddi e continentali

Kolokotroni et al. (2007) analizzano le conseguenze energetiche dell'incremento delle temperature per un edificio per uffici nel contesto di Londra. I risultati mostrano un incremento della domanda energetica estiva del 25% a causa dell'isola di calore, a fronte di una riduzione di quella invernale del 22%. Un ulteriore studio stima la variazione dei consumi energetici e delle relative emissioni di CO<sub>2</sub> per un ufficio a Londra considerando le temperature urbane attuali e gli scenari futuri di incremento delle temperature (Kolokotroni et al. 2012). Le previsioni confermano una diminuzione dei dispendi energetici per il riscaldamento e un incremento di quelli per il raffrescamento spostandosi dal contesto rurale al centro della città. Inoltre lo studio prevede un incremento dell'utilizzo dei sistemi di raffrescamento per il futuro, che nel 2050 potrebbe comportare un incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovute agli edifici per uffici pari a cinque volte quello attuale.

Dorier e Allegrini confermano una stessa tendenza anche per Basilea, in Svizzera (Allegrini et al. 2012; Dorier et al. 2013). I ricercatori analizzano l'impatto del microclima di differenti canyon urbani sulla domanda energetica annuale di un edificio per uffici. I risultati confermano una grande influenza del contesto urbano sul carico di raffrescamento. L'effetto dell'isola di calore determina un incremento della domanda di raffrescamento nel contesto urbano fino a 10 volte maggiore rispetto ad un contesto rurale, mentre la riduzione del carico di riscaldamento risulta molto meno significativa.

Una utile comparazione delle conseguenze energetiche del fenomeno a seconda della regione climatica di riferimento è stata effettuata da Crawley (2008). L'autore studia l'effetto degli scenari futuri dell'isola di calore sul consumo annuo di energia per un edificio per uffici in diverse regioni climatiche. I risultati mostrano che le regioni relativamente più colpite dall'incremento delle temperature da un punto di vista energetico sono quelle di media latitudine con clima temperato (categoria C nella classificazione di Köppen). In questo contesto climatico un incremento dell'isola di calore comporta il massimo incremento relativo dei consumi energetici, in quanto determina uno scambio di importanza tra la domanda invernale e quella estiva, data la previsione della necessità di climatizzazione anche nei mesi primaverili ed autunnali. Al contrario nelle regioni dal clima freddo, in cui la domanda energetica dipende dal carico di riscaldamento, un incremento delle temperature comporta una riduzione del consumo energetico annuale. Nelle regioni calde l'incremento di temperature determina ovviamente un aumento dei consumi energetici annuali, incidendo sulla domanda estiva, tuttavia la variazione relativa è minore rispetto a quella stimata per i climi temperati.

Alla luce di tali risultati, la conoscenza dell'entità dell'isola di calore appare necessaria per una corretta valutazione e stima dei consumi energetici per l'area del Mediterraneo, sia rispetto alla domanda di riscaldamento che, soprattutto, a quella di raffrescamento.

Nei paesi dell'Europa meridionale, infatti, il Ministero dell'ambiente conferma la stima effettuata da Crawley; a causa dell'aumento delle temperature massime maggiore di quello delle

minime e della minore efficienza dei sistemi di raffrescamento rispetto a quelli di riscaldamento la domanda di energia per il raffrescamento aumenterà più di quanto si ridurrà la domanda di energia per il riscaldamento e anche l'incremento dei costi per il raffrescamento supererà di gran lunga i risparmi sul riscaldamento (Ministero dell'ambiente 2014; Facility for Euro-Mediterranean Investment and Partnership 2008).

L'effetto dell'isola di calore viene invece ancora sistematicamente trascurato nella valutazione dell'efficienza energetica degli edifici, determinando errori di valutazione consistenti sia a scala di edificio che a scala urbana (Bueno et al. 2011).

## 2.1.4. Strategie di intervento per la mitigazione delle temperature

Il contesto urbano e rurale differiscono fortemente per le caratteristiche termo-radiative e la permeabilità dei materiali presenti.

Numerosi studi dimostrano che un incremento della presenza di vegetazione determinerebbe un abbattimento apprezzabile delle temperature, per effetto dell'ombra e del processo di evapotraspirazione (Giridharan et al. 2008; Gál 2014; Santamouris 2014a; Akbari & Konopacki 2005; Erell et al. 2011). Occorre però sottolineare che l'effetto benefico di tali misure è apprezzabile solo se la strategia del rinverdimento è applicata a scala urbana, attraverso un incremento consistente delle alberature e delle superfici vegetali a copertura degli spazi pubblici e privati e delle coperture degli edifici esistenti. Le superfici vegetali contribuiscono infatti a mantenere basse le temperature superficiali (vedi figura 43) tuttavia possono produrre un effetto benefico sulle temperature dell'aria solo se occupano una parte consistente del suolo urbano, altrimenti il loro effetto risulta estremamente localizzato e poco efficace per una riduzione delle temperature a scala locale o urbana.

Una seconda misura che trova ampio riscontro nella letteratura scientifica è l'impiego dei così detti "materiali freddi". Gli effetti benefici derivanti dall'impiego di questi materiali sono stati ampiamente trattati dal gruppo di ricerca "The Heat Island Group" al Lawrence Berkeley National Laboratory (Akbari et al. 2001; Rosenfeld et al. 1998; Rosenfeld et al. 1995; Akbari et al. 2001; Akbari et al. 1997). Le temperature superficiali possono essere abbassate agendo sull'albedo delle superfici.

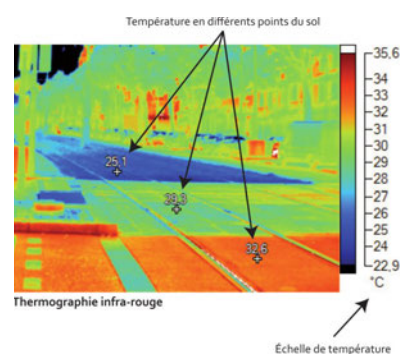
L'albedo varia tra 0 e 1 e indica la proporzione della radiazione solare incidente che viene riflessa dalla superficie. Un incremento dell'albedo delle superfici contribuisce all'abbattimento delle temperature in quanto consente una maggiore riflessione della radiazione a onda corta incidente e quindi una riduzione della radiazione che può essere immagazzinata dal sistema. Mantenendo basse le temperature superficiali di conseguenza anche gli strati di aria ad esse adiacenti diminuiscono proporzionalmente. Agire sul controllo dell'albedo implica dunque innescare una reazione a catena che modifica il clima del sistema (Taha 1997; Akbari et al. 1997; Santamouris 2014a; Gartland 2008).

L'effetto delle due strategie di mitigazione sul consumo energetico è stato valutato da Akbari et al. (Akbari & Konopacki 2005; Konopacki & Akbari 2000) su tre città americane: Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City. Gli autori testano le possibilità di risparmio energetico derivanti dagli effetti diretti e indiretti delle strategie di mitigazione delle temperature (incremento delle alberature per ombreggiare gli edifici, materiali riflettenti applicati a tetti e pavimenti e incremento consistente della vegetazione urbana).

L'effetto benefico maggiore si stima per Sacramento ed il minore per Salt Lake City, la città di riferimento con il clima più freddo. A fronte dell'applicazione diffusa delle strategie di mitigazione gli autori dimostrano che è possibile raggiungere un risparmio energetico quale somma degli effetti benefici diretti e indiretti tra il 12% e il 25% per gli edifici residenziali e tra il 5% e il 18% per gli uffici.



Photo « réelle »



**Figura 43** Foto e termografia di uno spazio pubblico caratterizzato da diversi materiali di finitura, APUR 2012





**Figura 44** Campagne di sensibilizzazione per l'applicazione diffusa dei tetti verdi a Beirut (StudiInvisible) e New York (Cooper Union)

### 2.1.5. Metodi di misurazione e strumenti di simulazione

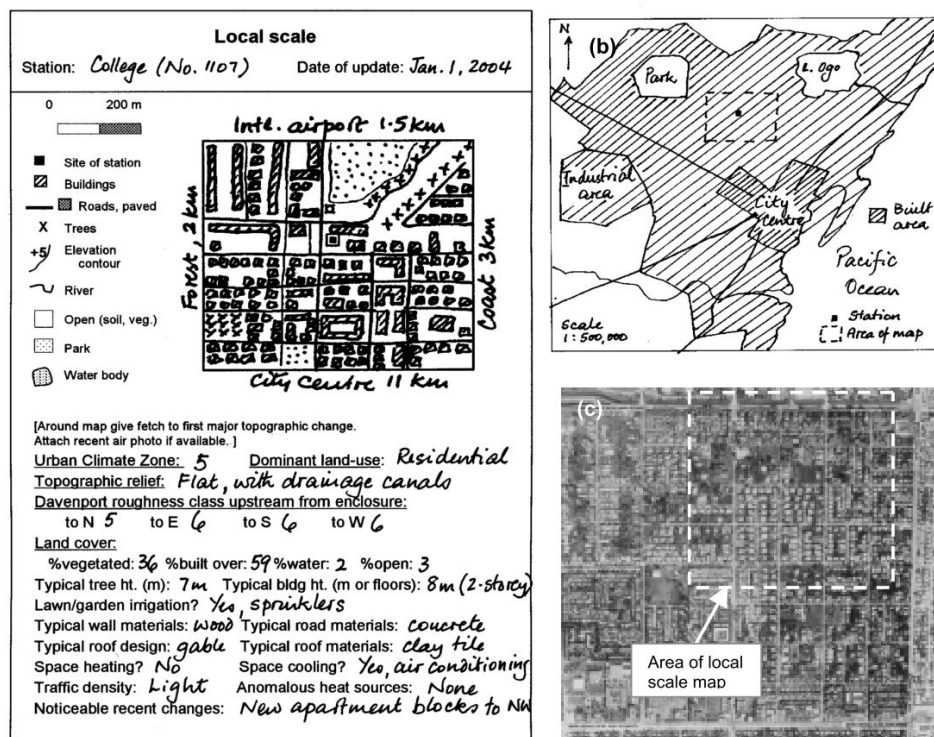
La maggior parte degli studi sperimentali sull'isola di calore si basano su tre tipologie di rilevazione dell'incremento delle temperature (Santamouris 2007):

1. Elaborazioni statistiche delle differenze di temperature rilevate tra coppie o gruppi di stazioni meteorologiche urbane e rurali
2. Risultati ottenuti da una rete di monitoraggio costituita da stazioni fisse
3. Rilevazioni mobili all'interno della città

Differenti studi e guide hanno sottolineato i criteri da seguire per una corretta scelta e descrizione dei siti di riferimento, sia urbani che rurali, che risultano necessari per una corretta interpretazione dei dati raccolti (Oke 2005; Oke 2006; Grimmond et al. 2010).

Il carattere empirico di questi studi tuttavia non consente di ottenere risultati utili per una prefigurazione del fenomeno in contesti differenti o al variare delle caratteristiche che si possono riscontrare in differenti aree della stessa città.

Per ovviare a tali limiti negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi software per la simulazione dei fenomeni fluidodinamici e del clima nelle aree urbane. Più recentemente la ricerca in questo campo è orientata ad una adeguata integrazione tra i modelli di clima urbano ed i modelli energetici degli edifici. Come ampiamente riportato, è dimostrato che ad una variazione del clima per effetto dell'isola di calore corrisponde una variazione del consumo energetico per mantenere condizioni di benessere termico interno. Ma è altrettanto vero che un incremento dei consumi energetici spesi per condizionare un ambiente interno influisce sul clima esterno in misura alquanto rilevante, attraverso una maggiore immissione in atmosfera del calore



**Figura 45** Informazioni minime necessarie per la descrizione dell'area di riferimento di una stazione meteorologica urbana come definite nella guida del WMO (Oke 2006): scheda descrittiva delle caratteristiche locali, localizzazione della stazione all'interno della regione urbana e foto aerea.

di scarto dei cicli termodinamici (De Munck et al. 2013; Bueno et al. 2012). L'interazione tra ambiente interno ed esterno è dunque reciproca e va valutata risolvendo entrambi i domini simultaneamente.

Negli ultimi 20 anni sono stati sviluppati modelli energetici e fluidodinamici in grado di fornire dati abbastanza affidabili sulle modificazioni climatiche indotte da un'area urbanizzata (Grimmond et al. 2010). I modelli di calcolo sono di due tipi: i modelli UCM ("Urban Canopy Model") ed i modelli CFD (computation fluid dynamics).

I primi si fondano sul bilancio energetico dei flussi di calore alle superfici del volume d'aria compreso nel canyon urbano. Tali flussi sono generalmente calcolati con equazioni analitiche o empiriche che considerano gli scambi energetici tra le superfici del volume d'aria nel canyon rispettivamente con le pareti dell'edificio, il suolo e lo strato di atmosfera superiore (Urban Boundary Layer). Il modello UCM calcola il campo delle temperature e dell'umidità nel volume di controllo. Il campo delle velocità è invece separato e deve essere inserito come input per il calcolo. Uno dei modelli UCM più diffusi e validati per la stima dell'UHI nella canopia urbana è il TEB - Town Energy Budget, sviluppato da Masson (2000) presso il CNRM-GAME.

I modelli CFD permettono di ottenere dati più accurati sulla distribuzione spaziale dell'UHI rispetto all'analisi UCM, risolvendo contemporaneamente le equazioni di governo dei fluidi nelle aree urbane (conservazione massa, conservazione quantità di moto, temperatura potenziale, passaggi di stato), ricavando sia il campo delle velocità che delle temperature. I limiti dei software CFD consistono in problemi computazionali e teorici non ancora risolti (Grimmond et al. 2010) e soprattutto nei tempi di calcolo. Una rappresentazione dettagliata della morfologia urbana comporta tempi di calcolo estremamente lunghi e potenza di elaborazione molto elevata.

Per quanto riguarda i software di analisi energetica, ad oggi si è raggiunto un elevato dettaglio nella modellazione dell'edificio e dei suoi componenti impiantistici. Software quali EnergyPlus o TRNSYS (Pernigotto & Gasparella 2013) sono in grado di fornire risultati accurati della domanda e del consumo energetico dell'edificio, in funzione delle caratteristiche architettoniche,

impiantistiche e degli schemi di funzionamento relativi alle differenti destinazioni d'uso. Il limite di questo tipo di strumenti per la valutazione del consumo energetico in ambiente urbano risiede nell'impiego di dati meteorologici standard, che non tengono in conto dell'aumento delle temperature indotto dall'isola di calore.

Per la valutazione integrata della performance energetica dell'edificio inserito in un contesto urbano e delle modificazioni microclimatiche indotte sono stati proposti diversi metodi di accoppiamento tra i modelli di simulazione del clima urbano (CFD o UCM) e i modelli di simulazione energetica a scala di edificio (BEM). Bueno (2012) propone un accoppiamento tra TEB e Energy Plus, Yang et al. (2012) utilizzano il software fluidodinamico ENVI-met (ENVI-met, 2009) con il modello energetico Energy Plus. Dorer et al (2012), propongono un metodo per l'accoppiamento del software di simulazione energetico TRNSYS con un modello CFD.

Il modello "accoppiato" permette di valutare in maniera integrata l'interazione energetica tra interno ed esterno dell'edificio; tuttavia i tempi di simulazione e la capacità computazionale richiesta non permettono una facile riproduzione del metodo di analisi, determinando una scarsa applicabilità di tale metodologia nel campo della progettazione o della pianificazione.

Alcuni importanti avanzamenti per la valutazione integrata dello scambio energetico reciproco tra ambiente interno e clima urbano sono stati compiuti attraverso lo sviluppo di modelli semplificati del comportamento energetico degli edifici integrati in modelli UCM (Kikegawa et al. 2003). Un modello completo è stato sviluppato da Bueno (Bueno et al. 2013) nell'ambito del progetto "Urban Microclimate" presso il Massachusetts Institute of Technology. Il modello "Urban Weather Generator" (UWG) permette di trasformare i dati climatici di una stazione meteorologica rurale in dati urbani. Nel calcolo si considerano le relazioni fisiche fondamentali che governano le interazioni energetiche tra edifici e ambiente urbano, includendo tutti i parametri di progettazione tipicamente utilizzati nella costruzione che hanno un ruolo nella generazione dell'isola di calore. Inoltre il modello UWG è basato su una formulazione stato-spazio, che può essere facilmente risolta attraverso il programma numerico Matlab, consentendo analisi parametriche veloci e utili a valutare l'effetto sul clima urbano determinato da scelte progettuali a scala di edificio o urbana. L'accuratezza del modello risulta accettabile, tanto nella valutazione dell'isola di calore quanto per l'esecuzione di valutazioni più realistiche del consumo energetico in ambito urbano (Street et al. 2013), risultando idoneo per applicazioni nel settore edile, urbanistico o di pianificazione urbana.



## 2.2 Morfologia urbana, energia e microclima

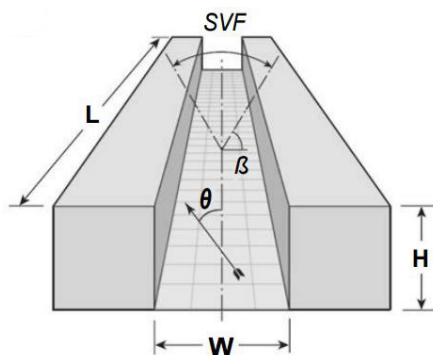
La morfologia urbana gioca un ruolo rilevante nella formazione e nell'intensità dell'isola di calore a livello locale, in quanto partecipa ai principali fenomeni termo-radiativi responsabili dell'innalzamento delle temperature (Erell 2008; Oke 1988; Theeuwes et al. 2014; Andreou & Axarli 2012; Takebayashi & Moriyama 2012; Allegrini et al. 2012). Tale modificazione microclimatica comporta una variazione dei consumi energetici a livello urbano, che sarà tanto più gravosa, quanto più pronunciato è l'effetto dell'isola di calore nell'area considerata.

Nel tentativo di contribuire alla comprensione delle relazioni energetiche che si instaurano in un sistema urbano, non si può prescindere dalla definizione delle principali variabili fisico-strutturali che rivestono importanza nella determinazione della domanda energetica del costruito.

Se la chiave di lettura è il microclima urbano e le sue modificazioni in funzione della forma, della densità e della dimensione urbana di riferimento, occorre individuare un metodo di misurazione e quantificazione di tali variabili e della loro rilevanza nello sviluppo dell'isola di calore urbana.

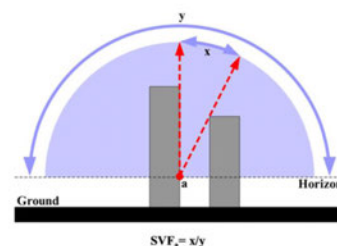
Nel campo della climatologia il problema viene approcciato mediante lo studio di uno spazio urbano "astratto", il canyon urbano. Tale unità tridimensionale, costituita dalle pareti di due edifici prospicienti e dalla superficie orizzontale tra di essi, permette lo studio e la simulazione dei fenomeni dovuti all'interazione tra le superfici urbane coinvolte nel bilancio energetico.

Il modello del canyon urbano rappresenta una delle più efficaci rappresentazioni della geometria urbana ed è stato utilizzato tanto al fine della valutazione dell'isola di calore che del comportamento energetico dell'edificio in relazione all'accesso solare.



**Figura 46** Rappresentazione del canyon urbano e dei parametri geometrici che ne individuano le caratteristiche: il rapporto di verticalità  $H/W$  e lo Sky View Factor (SVF), Fonte: Erell 2011

La forza di tale modello risiede proprio nella sua semplicità: il canyon può essere descritto attraverso un solo parametro, che sia il cosiddetto "aspect ratio" (o rapporto di verticalità), dato dalla relazione tra l'altezza degli edifici ( $H$  – height) e la larghezza della strada ( $W$  – width) o dallo Sky View Factor (SVF). Lo sky view factor è un parametro adimensionale, variabile tra 0 e 1. Geometricamente rappresenta la frazione di cielo visibile calcolata sull'emisfera centrata nel punto di analisi ed indica pertanto il grado di esposizione al cielo di un qualsiasi punto all'interno del canyon (Zhang et al. 2012; Oke 1988). Il rapporto di verticalità e lo SVF sono indicatori particolarmente utili per la valutazione della prestazione energetica e ambientale dell'edificio ma anche degli effetti psicologici e percettivi legati alla densità; in quanto indicano in che misura la luce naturale e la radiazione diretta penetrano nei canyon urbani. Lo schema del canyon urbano permette quindi di comparare la performance energetica e climatica di porzioni di città rappresentando solo la proporzione degli spazi esterni e per tale semplicità ed efficacia è stato ampiamente utilizzato negli studi dell'isola di calore o della performance energetica dell'edificio.



**Figura 47** Definizione geometrica dello Sky View Factor. Fonte: Zhang et al., 2012

*“The urban canyon has been used in urban climatology as a principal concept for describing the basic pattern of urban space defined by two adjacent buildings and the ground plane. Apart from its metaphorical beauty, the key quality of the term is the simplicity it offers in describing a repeated pattern in the otherwise complex field of urban spaces and building forms<sup>1</sup>”* (Strømman-Andersen & Sattrup 2011)

Tuttavia tale modello risulta insufficiente a descrivere le caratteristiche formali e tridimensionali della morfologia urbana, che presuppone la conoscenza di tre entità spaziali (Conzen 2004):

1. La rete stradale (*streets system*)
2. Gli isolati e la loro aggregazione (*plot pattern*)
3. La morfologia degli edifici (*building pattern*)

In questo paragrafo si presentano i processi termici e meccanici alla base dell'interazione tra morfologia urbana, innalzamento delle temperature e variazione della domanda energetica, al fine di evidenziare le caratteristiche geometriche ed i parametri morfologici e di densità più utili a individuare relazioni affidabili tra le prestazioni energetiche o climatiche e le caratteristiche morfologiche del tessuto urbano.

La morfologia urbana influisce, infatti, non solo sul fenomeno dell'isola di calore, che indirettamente determina un aumento dei consumi energetici, ma anche in maniera diretta sugli apporti energetici di luce e calore per l'edificato. Tale contributo nel contesto Mediterraneo risulta molto rilevante, in quanto gli apporti radiativi determinano buona parte del bilancio energetico globale (Curreli 2015; Morganti 2013)

Allo stato attuale, questi due effetti energetici legati alla morfologia urbana sono stati perlopiù studiati separatamente.

In climi temperati, quale il clima Mediterraneo, i due effetti potrebbero essere in conflitto, ovvero risultare favorevoli per la stagione calda e sfavorevoli per la fredda, o viceversa. I risultati degli studi condotti e che sono di seguito presentati vanno pertanto considerati criticamente in funzione del clima di riferimento.

### 2.2.1. Fenomeni termici indotti dalla morfologia urbana

La distribuzione spaziale delle temperature dell'aria e l'intensità dell'isola di calore non sono uniformi all'interno della città (Álvarez, 2013; Stewart & Oke, 2012): è stato ampiamente osservato che il fenomeno si manifesta con maggiore intensità nelle aree più dense di edificato e con scarsa presenza di vegetazione (de la Flor & Domínguez 2004; Giridharan et al. 2007; Giridharan et al. 2004; Kolokotroni & Giridharan 2008; APUR 2012; Oke 1988).

Ciò succede perché la morfologia e le caratteristiche termo-radiative delle superfici urbane modificano il bilancio energetico determinando un incremento della radiazione netta  $Q^*$ , attraverso fenomeni termici e radiativi che incidono sia sulle componenti di radiazione a onda lunga che su quelle a onda corta. La riflessione globale del sistema edifici-aria dipende infatti dall'albedo delle singole superfici riflettenti ma anche dalle proprietà geometriche dell'edificato.

Diversi studi si sono concentrati sull'individuazione del ruolo della morfologia urbana sull'intensità dell'isola di calore, studiando la variazione delle temperature dell'aria in funzione dei

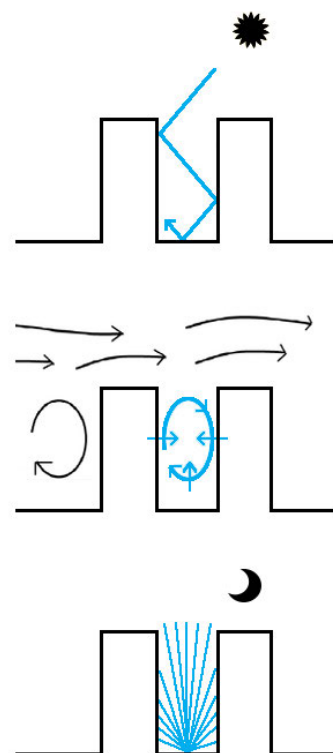
<sup>1</sup>Traduzione: “Il canyon urbano è stato utilizzato in climatologia come concetto fondamentale per descrivere la struttura base dello spazio urbano, definito da due edifici adiacenti e dal piano della strada. Oltre alla sua metaforica bellezza, la sua qualità chiave consiste nella semplicità con cui permette di descrivere attraverso la ripetizione una configurazione urbana, superando la complessità della forma degli edifici e degli spazi urbani”

processi fisici che si instaurano in canyon urbani di differenti proporzioni. La densità e la conformazione del costruito influiscono sull'andamento delle temperature mediante tre processi (Oke 1988).

In primo luogo nelle configurazioni urbane dense e compatte la proporzione dei canyon urbani determina una riflessione multipla della radiazione incidente. Tale fenomeno è noto come "trapping radiativo" e comporta un maggior assorbimento della radiazione, favorendo il surriscaldamento delle superfici e quindi dell'aria.

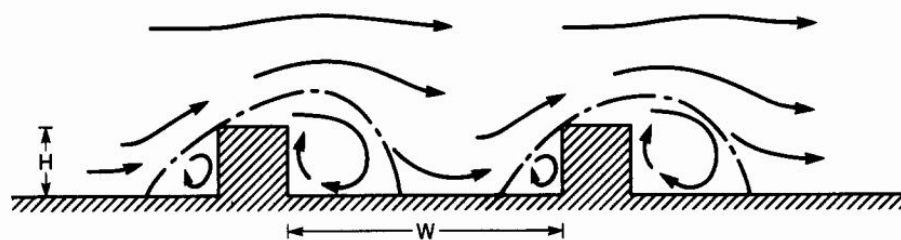
Per gli stessi motivi geometrico-morfologici il processo di raffreddamento delle superfici attraverso l'emissione di radiazione a onda lunga durante la notte è ridotto e rallentato a causa dell'ostruzione della volta celeste da parte degli edifici stessi. La volta celeste è, infatti, il più importante dissipatore di energia nella regione dell'infrarosso, in quanto costituisce una regione molto più fredda delle superfici urbane. Durante le notti estive la differenza tra la temperatura dell'aria e del cielo raggiunge anche 15°C (Gliha et al. 2011; Adelard et al. 1998), al contrario le superfici urbane rimangono calde sia in estate, a seguito del surriscaldamento diurno, sia in inverno a causa della presenza di sistemi di riscaldamento degli edifici. Dal tardo pomeriggio si assiste quindi ad un progressivo aumento della differenza di temperatura tra la città e la campagna, tanto che la massima intensità dell'isola di calore normalmente si registra dopo il tramonto e nelle ore notturne, quando gli edifici surriscaldati rilasciano calore che difficilmente si disperde verso il cielo. La morfologia urbana rappresenta quindi un ostacolo al processo di raffreddamento notturno e pertanto in un tessuto urbano denso e compatto di notte si verificano temperature più elevate rispetto a zone urbane meno densamente costruite.

Infine la geometria dei canyon e la densità dell'edificato ostacolano notevolmente la velocità

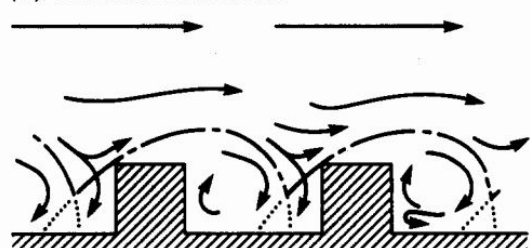


**Figura 48** Fenomeni termici e meccanici che si producono nella canpoia urbana in funzione della geometria del canyon. Elaborazione personale.

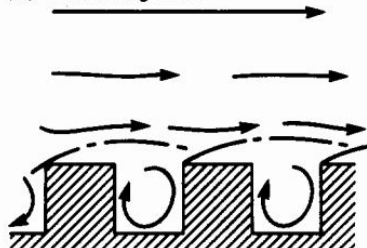
**(a) Isolated roughness flow**



**(b) Wake interference flow**



**(c) Skimming flow**



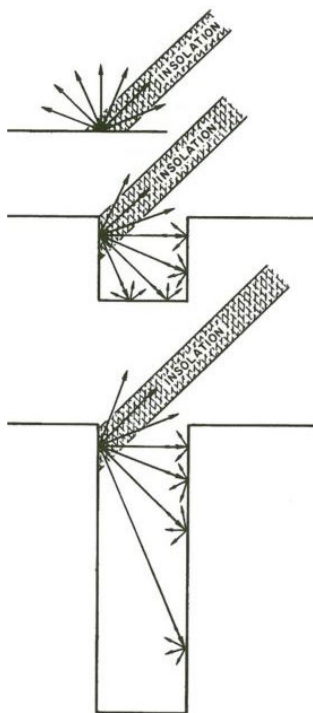
**Figura 49** Schemi del flusso dell'aria nella canopia urbana per differenti proporzioni dei canyon urbani. Fonte: Oke 1988

del vento nella canopia urbana rispetto ad un campo aperto, che risulta in un minor trasferimento di calore sensibile al di fuori del canyon.

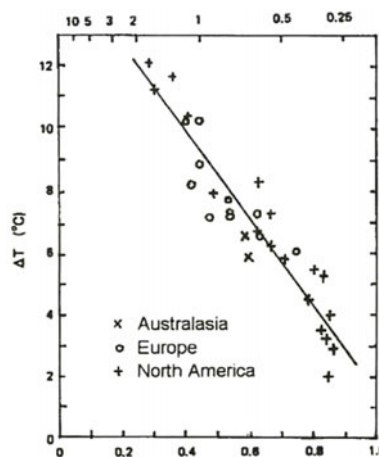
## 2.2.2. Morfologia dei canyon e temperatura dell'aria

Diversi studi hanno approfondito la relazione tra la morfologia urbana e l'intensità dell'isola di calore, parametrizzando la geometria urbana principalmente attraverso due indici adimensionali: lo SVF o il rapporto di verticalità del canyon (Unger 2004; Stewart & Oke 2009; Oke 1988; Wong et al. 2011; Cantelli et al. 2015; Stewart & Oke 2012). A differenza della definizione





**Figura 50** Riflessioni multiple della radiazione in canyon urbani di differente proporzione. Fonte : Givoni 1998



**Figura 51** Relazione tra SVF e isola di calore massima notturna secondo Oke. Fonte: Givoni 1998

geometrica precedentemente fornita, negli studi climatologici lo Sky View Factor è definito come il rapporto tra la radiazione ricevuta (o emessa) da una superficie planare e la radiazione emessa (o ricevuta) dalla volta celeste (Zhang et al. 2012). Nella teoria della *radiosità* le interazioni tra due elementi distinti di una scena, incluso il cielo, sono descritte mediante un fattore puramente geometrico, il "fattore di vista". Questo termine, che deriva da una doppia integrazione dei due elementi posti in relazione, è proporzionale ai coseni degli angoli formati dal segmento che collega i centri delle superfici con le loro perpendicolari, ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Il suo significato fisico, dedotto dalla teoria degli scambi radiativi, è che rappresenta la percentuale di potenza totale che lascia il primo elemento ed è ricevuta dal secondo (Beckers 2007). Lo SVF è pertanto un caso particolare del "fattore di vista", che permette di tenere in considerazione l'importanza delle differenti porzioni della volta celeste, dando più peso alle parti più vicine allo zenith rispetto a quelle vicino all'orizzonte (Zhang et al. 2012). Il valore dello SVF delle superfici del canyon ha quindi indubbiamente una relazione con il fenomeno dell'isola di calore e può essere calcolato mediante molteplici metodi, più o meno semplificati (Unger 2009; Matuschek & Matzarakis 1988; Kastendeuch 2013; Brown et al. 2001; Hämmerle et al. 2011).

Oke (Oke 1981; Oke 1988) ha individuato una relazione empirica tra lo SVF (o H/W) e l'intensità dell'isola di calore, fornendo le seguenti relazioni:

$$\Delta T_{a,max} = 15.27 - 13.88 \times SVF$$

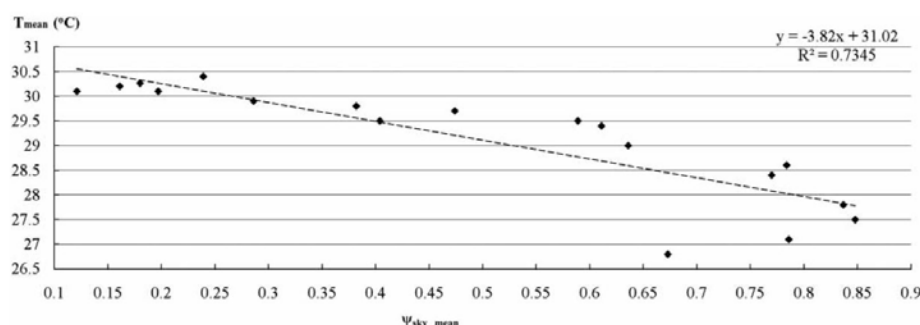
$$\Delta T_{a,max} = 7.45 + 3.97 \times H/W$$

Le equazioni proposte derivano dall'analisi di dati relativi a città nord americane, europee ed australiane, con una popolazione compresa tra i 1.100 e 8.500.000 abitanti e stima il valore del  $\Delta T_{max}$  che si misura di sera, in condizioni di cielo sereno.

Un lavoro di review sul tema è stato svolto da Unger (2004) che riporta numerose relazioni tra lo SVF e l'intensità dell'isola di calore individuate in studi precedenti (tabella 3). Lo stesso Unger si serve di simulazioni dell'isola di Calore e di un database di parametri morfologici urbani per determinare una relazione tra lo SVF e l'intensità dell'UHI per la città Szeged, in Ungheria. La relazione individuata conferma un decremento dell'intensità del fenomeno al crescere del valore dello SVF. Tuttavia l'autore evidenzia che i risultati presentati sono spesso contraddittori e a volte poco affidabili, in quanto frutto di osservazioni e misurazioni su parti limitate e non omogenee di città.

Più recentemente sono stati effettuati studi di questo tipo in differenti città asiatiche. Uno studio condotto per la città di Hong Kong (Chao & Liang 2011) individua una relazione soddisfacente tra lo SVF-medio e il  $\Delta T_{max}$ , sulla base di misurazioni effettuate durante una notte serena. L'analisi dimostra che un aumento dello SVF di 0.1 corrisponde a una diminuzione di temperatura di circa 0.4 °C (figura 52).

Studi recenti condotti per la città di Singapore confermano che la densità e l'altezza media degli edifici, insieme alla percentuale di superficie permeabile, rappresentano i fattori principalmente responsabili dell'innalzamento delle temperature urbane (Wong et al. 2011).



**Figura 52** Correlazione lineare tra SVF e UHI individuata da Chao e Liang (2011) per la città di Hong Kong,

Table 2. Survey of sky view factor (SVF) or height/width ( $H/W$ ) ratio (independent variable) versus air temperature ( $T_a$ ) (dependent variable) investigations: study area (CBD: central business district) and its size, measurement methods, range of independent variable, number of element pairs, regression coefficients  $a$  and  $b$  ( $Y = a + bX$ , where  $Y$  is temperature or cooling rate and  $X$  is SVF or  $H/W$ ) and significance level (–: no information) are shown. CC: Central city, CP: Central park, T: Transition

Urban area	Size	SVF (or $H/W$ ) (methods)	Range of SVF (or $H/W$ )	$T_a$	No. of pairs	$a$	$b$	Significance	Source
Mainly the inner part of a city (Reading, UK)	~8–9 km <sup>2</sup>	Surveying techniques by sites	0.83–0.97	Mean daily minimum	6	–	–	–	Parry (1967)
Central parts of different cities	–	City mean from average $H/W$ City mean of $H/W$	0.30–0.86 0.30–3.25	Observed $\Delta T_{a,max}$	31	15.27	–13.88	1%	Oke (1981)
Along an urban transect (Birmingham, UK)	20 km long	Surveying techniques by sites	0.73–0.99	Max. cooling rates from mobile measurements in 8 d	27	–	–	1%	Johnson (1985)
~1 × 8 km strip from rural area to the centre (Malmö, Sweden)	~8 km <sup>2</sup>	Fish-eye photos by sites	0.52–0.95	$T_a$ from 1 mobile measurement	75	–	–	1%	Barrington et al. (1985)
				Mean $T_a$ from 5 mobile measurements	75	–	–	1%	
5 Japanese cities (Tachikawa, Fuchu, Fussa, Higashimurayama, Akikawa)	~9–26 km <sup>2</sup>	Fish-eye photos by sites	0.4–0.85	$T_a$ from 1 mobile measurement by cities	9–21	4.11	–1.00	1%	Yamashita et al. (1986)
		Fish-eye photos, minimum value by cities	0.40–0.72	$\Delta T_a$ from 2 mobile measurements by city, 1 by day and 1 at night	5	–	–	–	
CBD in Japanese cities	–	Fish-eye photos, means of 36 sites	0.26–0.78	$\Delta T_{a,max}$ from 'many' mobile measurements	13	10.15	–12.00	1%	Park (1987)
CBD in Korean cities	–		0.36–0.84	$\Delta T_{a,max}$ from 'some' mobile measurements	6	12.23	–14.00	1%	
Central parts in North American cities	–	From Oke (1981)	0.28–0.86	From Oke (1981)	18	16.34	–15.00	1%	
Central parts in European cities	–		0.40–0.75		11	13.20	–10.00	1%	
Different parts of a city (Göteborg, Sweden)	–	Surveying techniques by sites	–	$T_a$ from 1 mobile measurement at 2 levels	17	–	–	No	Eliasson (1992)
Different parts of a city (Göteborg)	~4 km <sup>2</sup>	Surveying techniques by sites complemented by fish-eye photos	0.33–1.00 0.41–1.00	$T_a$ from 6 mobile measurement Mean $T_a$ of 3 mobile measurements (canyon-crossing/open area)	10–30 18	–	–	No	Eliasson (1996)
Along an urban transect (Göteborg)	8 km long		0.33–1.00	$T_a$ from 1 mobile measurement	–	–	–	–	
Different parts of a city, along urban transects (Göteborg)	~2 km <sup>2</sup>	Fish-eye photos by sites	0.39–0.91	$T_a$ from fixed sensors in 21 mo and from 16 mobile measurements	42	–	–	No	Upmanis et al. (1998)
Different parts of a city (Göteborg)	~1.5 km <sup>2</sup>		0.43–0.91	Mean cooling rates from fixed sensors on 22 nights	6	–	–	–	
Along an urban transect (Göteborg)	~3.3 km long	Fish-eye photos by sites	0.43–0.91	$T_a$ anomaly from the mean of fixed sensors on 55 nights	14	–	–	–	Upmanis & Chen (1999)
Along an urban transect including 5 land use types (Göteborg)	–	Fish-eye photos by sites	0.38–1.00	Mean $T_a$ from 6 mobile measurements in winter	8 in CC	–	–	No	Upmanis (1999)
					8 in T	–	–	10%	
	–		0.41–1.00	Mean $T_a$ from 9–10 mobile measurements in summer	7 in CC	–	–	No	
					8 in T	–	–	11%	
			0.60–0.80		6 in CP	–	–	3%	
	–		0.40–1.00	$T_a$ from 1 mobile measurement at 2 levels (2 and 0.3 m) on 8 July 1994	8 in CC	16.10	2.40	21%	
				$T_a$ from 1 mobile measurement at 2 levels (2 and 0.3 m) on 14 Feb 1994	8 in CC	17.70	2.50	11%	
					8 in CC	–3.80	–1.20	22%	
					8 in CC	–3.60	–1.80	11%	
17 housing estates (Singapore)	0.45–12.76 km <sup>2</sup> by estates	Median $H/W$ by estates based on 3D database of buildings and streets	1.28–2.72	Max. $\Delta T_a$ from 2 mobile measurements by estates	17	0.02	0.95	1%	Goh & Chang (1999)
One district of a city (Belo Horizonte, Brazil)	~2 km <sup>2</sup>	3D database of buildings and topography (Autocad, MapInfo)	0.43–0.61	$T_a$ from 1 mobile measurement	7, 19:00 h 7, 06:00 h 7, 15:00 h	27.75 – –	–2.56 – –	10% 20% No	Santos et al. (2003)
One city (Szeged, Hungary)	26.75 km <sup>2</sup>	Mean SVF by cells from several measurements by surveying techniques	0.67–1.00	Mean $\Delta T_a$ from 35 mobile measurements	107	5.90	–4.62	1%	Present study
				Mean $\Delta T_a$ from 17 mobile measurements (defoliated season)	107	5.99	–4.81	1%	
				Mean $\Delta T_a$ from 18 mobile measurements (green season)	107	5.81	–4.44	1%	
				$\Delta T_a$ from 1 mobile measurement on 18 Sep 2002	107	10.49	–9.23	1%	
				$\Delta T_a$ from 1 mobile measurement on 25 Mar 2003	107	13.28	–12.03	1%	

**Tabella 3** Correlazioni tra SVF o  $H/W$  e temperatura dell'aria negli studi analizzati da Unger, 2004

Per quanto riguarda i climi caldi aridi, Johansson (2006) effettua la comparazione, mediante misurazioni, del comportamento termico di due canyon con rapporto di verticalità molto differente nella città di Fez, in Marocco: un canyon estremamente stretto ( $H/W=9.7$ ) ed uno largo ( $H/W=.6$ ). Durante il giorno il canyon stretto mantiene temperature più basse di quello largo, risultando favorevole per il comfort termico durante la stagione estiva. Al contrario, il canyon più largo presenta temperature mediamente superiori durante la stagione invernale, in virtù del migliore accesso solare.

Uno studio condotto nella città di Costantina, in Algeria (Bourbia & Boucheriba 2010) propone una relazione tra la temperatura media radiante e lo SVF, ritenuta più significativa rispetto alla temperatura dell'aria e più utile al fine della valutazione del comfort urbano. Lo studio inoltre evidenzia una maggiore dipendenza diurna delle temperature dell'aria rispetto allo SVF, rispetto alle variazioni notturne. Per bassi valori di SVF si registrano temperature massime dell'aria nettamente minori rispetto a morfologie più aperte. Non si rileva invece una uguale differenza di notte, quando le varie stazioni di misurazioni registrano temperature molto simili in contesti morfologici molto diversi.

In definitiva, come affermato da Givoni (Givoni 1998), non è possibile individuare una relazione univoca tra UHI e SVF ed i risultati contrastanti non stupiscono, in quanto tale relazione può esistere solo se valutata ad opportuna scala di riferimento, in condizioni di vento debole ed in aree urbane omogenee rispetto all'uso del suolo (centro città).

L'eterogeneità degli studi presentati, le contraddizioni rilevate ed i climi a cui sono riferiti non permette di trarre conclusioni o linee guida di progetto per il contesto Mediterraneo, per il quale si necessita un'attenzione tanto durante la stagione estiva che invernale.

Tuttavia, lo studio della performance climatica della forma urbana risulta particolarmente utile nel campo della progettazione e della pianificazione urbana. In uno studio del 1988 Oke analizza la relazione tra la proporzione del canyon e la performance climatica, con l'obiettivo di applicare le conoscenze della climatologia urbana al campo della pianificazione per garantire uno sfruttamento efficace delle risorse naturali e climatiche. Nello specifico Oke affronta il problema delle regioni con clima continentale (lat  $45^{\circ}\text{N}$ ), in cui l'edificato deve garantire una protezione dalle temperature e dai venti invernali favorendo però l'accesso solare. Per queste latitudini Oke afferma che:

*"Traditional European urban form are climatically more favourable than more modern, especially North American ones"* (Oke 1988)

Una conformazione compatta dell'edificato rispetto ad una più dispersa assicura infatti un riparo dai venti freddi e permette un innalzamento delle temperature grazie all'effetto dell'isola di calore, garantendo allo stesso tempo un buon soleggiamento delle facciate.

Nel contesto mediterraneo, gli effetti climatici benefici e desiderabili sono decisamente diversi rispetto ai climi continentali: la ventilazione naturale dovrebbe essere rafforzata e l'effetto dell'isola di calore mitigato. Per quanto riguarda l'accesso solare, il tema è contrastante a queste latitudini: sebbene alti guadagni solari consentono un significativo risparmio energetico per il riscaldamento, in realtà il problema del surriscaldamento estivo sembra essere più preoccupante da un punto di vista energetico e del comfort indoor (Morganti et al. 2012).

### 2.2.3. Morfologia urbana e domanda energetica

Storicamente, forma e dimensione sono tra i primi parametri considerati nell'analisi della relazione tra città fisica e consumi energetici. Nel contesto Mediterraneo la morfologia urbana gioca un ruolo importante su due *tipi* di energia: la radiazione solare ed i consumi ascrivibili

alla domanda di condizionamento. Aree urbane “densamente ostruite” sono private della luce naturale e degli apporti termici solari, che possono tradursi in variazioni dei consumi energetici significativi sia nella stagione estiva che invernale.

Nella valutazione della performance energetica di un edificio la morfologia del contesto riveste, pertanto, un *ruolo diretto* fondamentale, troppo spesso omesso o trascurato.

Lo studio della relazione tra forma ed energia è un tema che ha affascinato architetti e ricercatori da molti anni a questa parte.

A Gropius si deve una prima riflessione esplicita sulla forma che dovrebbe avere l'edificio per rispondere a criteri di alta densità, economicità e uso razionale del territorio, considerando il soleggiamento delle facciate come un importante criterio di giudizio. La sua riflessione su forma, altezza e orientamento dell'edificio porta a concludere che, al fine di avere almeno 2 ore di soleggiamento durante il solstizio invernale:

(...) la distanza tra le file dev'essere pari a una volta e mezza l'altezza degli edifici, con blocchi orientati nord-sud, due volte e mezza nel caso di orientamento est-ovest, due volte con orientamento diagonale. Questa regola prova che l'orientamento nord-sud è il più vantaggioso per lo sfruttamento economico del terreno<sup>3</sup>. (Gropius 1930)

Un capostipite di molti lavori successivi su questa tematica di indagine è rappresentato dall'opera di Knowles (1974), che riflette sulle strategie di progettazione dell'insediamento urbano in funzione della radiazione solare, per ottimizzare gli apporti energetici termici e luminosi del sole.

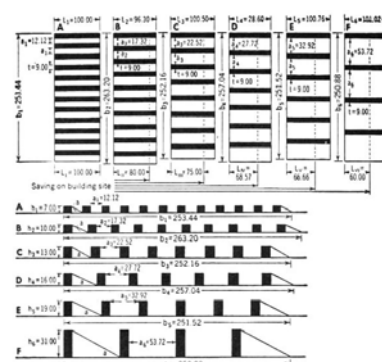
I primi tentativi volti a strutturare un metodo scientificamente corretto per esplicitare una relazione tra “forma e prestazione” si devono però a Martin e March (Martin & March 1972). Nel loro libro “Urban space and structure”, la struttura fisica della città viene modellata attraverso poche “forme archetipe”, utili a semplificare la complessità urbana e a valutarne la “performance” in funzione delle sole caratteristiche geometriche.

I modelli sono fondati sulla ripetizione di due forme, denominate “court” e “pavillion”, che intendono rappresentare le due modalità di disposizione dell'edificio sul territorio: in forma continua (court- edifici a corte o in linea) o discontinua (pavillion - edificio a torre). Sulla base di questa modellazione gli autori tentano di dare una risposta a domande quali: “che forma dovrebbe avere un edificio per ridurre le dispersioni termiche?”, oppure “Come dovrebbero essere disposti gli edifici per garantire il miglior uso del territorio?”. A prescindere dai risultati, che ovviamente presentano il limite del tempo e dell'estremo grado di semplificazione, l'approccio proposto da Martin e March ha costituito un motivo di ispirazione ed un riferimento per numerosi studi negli anni a seguire, fino a tempi recentissimi.

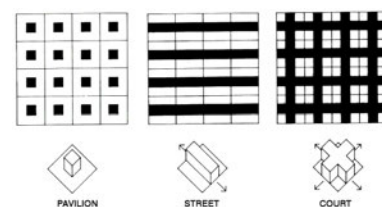
La relazione tra morfologia urbana, accesso solare e domanda energetica rappresenta, infatti, ancora un tema di grande interesse.

Non tener in conto della variazione degli apporti di luce e calore dovuti alle ostruzioni urbane può condurre ad errori considerevoli nella stima della domanda energetica. Sulla base di questo tipo di approccio, sono stati sviluppati numerosi studi volti ad evidenziare la variazione della prestazione energetica in funzione della “forma” dell'edificio (Sanaieian et al. 2014).

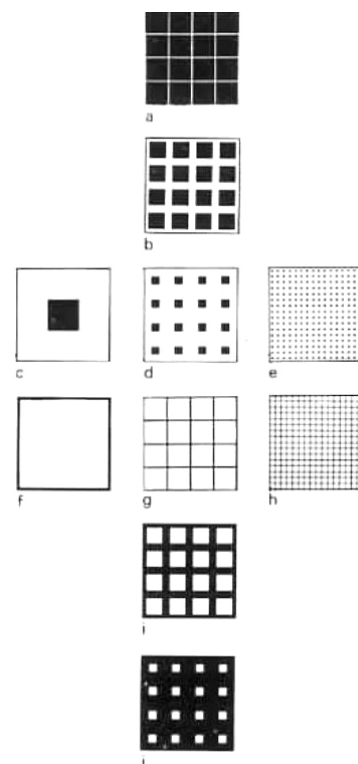
I molteplici studi prodotti negli riguardano contesti climatici diversi, ma sono accomunati dal fine comune di valutare la sostenibilità degli ambienti urbani più o meno densamente costruiti, tenendo in conto della molteplicità dei fenomeni energetici in cui la forma e la morfologia rivestono un ruolo importante.



**Figura 53** Studio della relazione tra altezza e distanza dei fabbricati in funzione del soleggiamento minimo invernale, Gropius 1930. tratto da



**Figura 54** Forme archetipe utilizzate negli studi di Martin e March (1972)



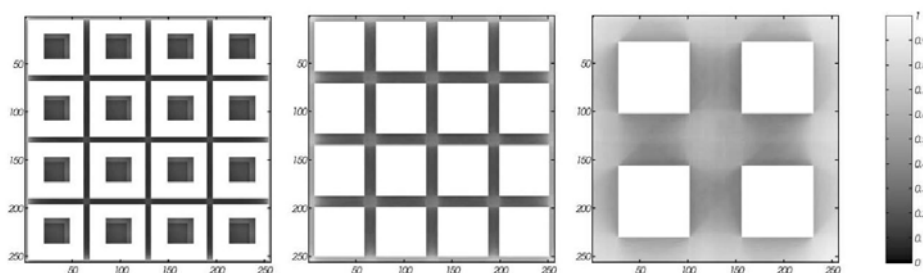
**Figura 55** Possibili conformazioni per un'occupazione del suolo dal 10% al 90% attraverso la ripetizione delle forme archetipe del “Pavillion” e della “Court”, Martin and March (1972)

<sup>3</sup> Gropius, W. (1930) *Case alte, case medie o case basse?* Conferenza tenuta al Terzo congresso internazionale per la Nuova Edilizia a Bruxelles nel 1930, In *DAS NEUE FRANKFURT 1926-1931* (I.), a cura di Giorgio Grassi, edizioni DEDALO, p. 338

### 2.2.4. Geometria urbana e comportamento energetico

Il rapporto tra morfologia urbana ed energia è stato approfondito con maggiore propensione in relazione alle esigenze dei paesi freddi, prevalentemente in funzione dell'accesso solare che costituisce un essenziale guadagno termico "gratuito" per il riscaldamento invernale. Non mancano, tuttavia, studi analoghi per i climi caldi.

Applicando lo stesso tipo di modellazione proposto da Martin e March, ma avvalendosi di strumenti di calcolo decisamente più potenti, Ratti et al (2003) propongono uno studio comparativo della performance climatica di tre morfologie urbane in clima caldo arido. Le tre strutture urbane di riferimento sono costituite dalla ripetizione del tipo "court" e "pavilion" individuato da Martin e March. I modelli individuati (fig 56) sono analizzati e rappresentati per mezzo di DEMs (Digital Elevation Model), che sono immagini della loro proiezione orizzontale in cui pixel rappresentano, attraverso una scala di grigi, l'altezza di ciascuna superficie urbana. Attraverso tecniche di elaborazione dell'immagine (in questo caso Matlab image processing toolbox), Ratti analizza e compara la variazione dello SVF, della densità di ombre e della luce naturale



**Figura 56** Variazione dello SVF nelle tre configurazioni, Ratti (2003)

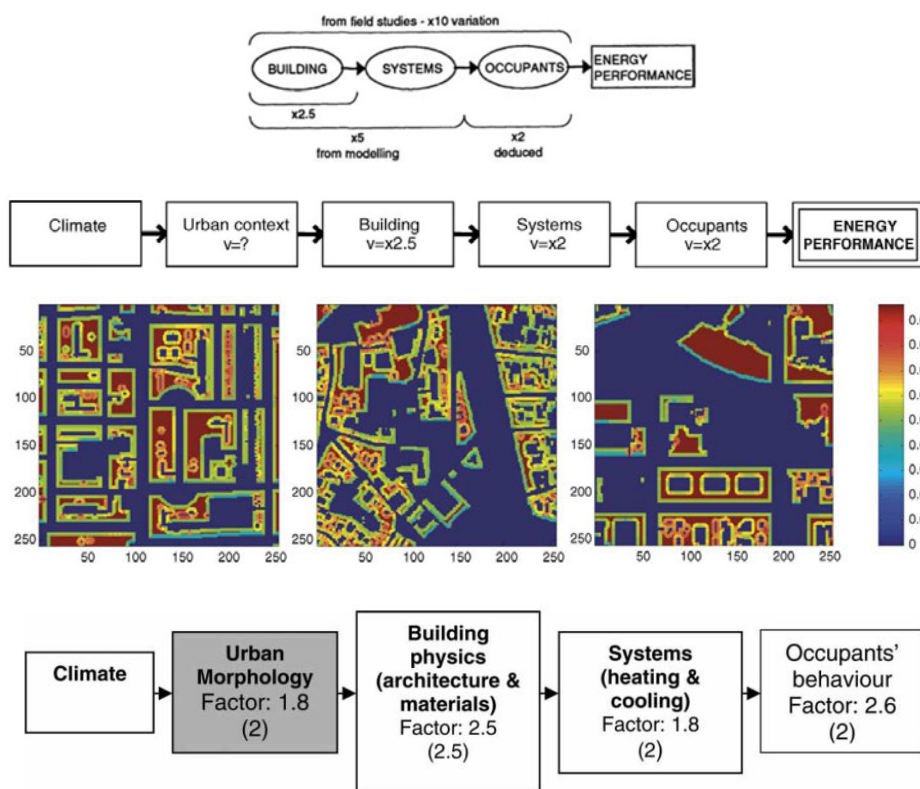
nei tre casi di studio. I risultati dimostrano che alcune morfologie possiedono una performance "ambientale" migliore di altre. Con riferimento al clima caldo-arido, la tipologia a corte rappresenta il caso più vantaggioso, in quanto presenta la massima densità di ombre e bassi valori di SVF, seppur il fattore di luce naturale sia il più basso tra le tre configurazioni analizzate.

Lo stesso Ratti mostra le potenzialità dell'utilizzo dei DEMs per analisi parametriche urbane, attraverso un ulteriore studio (Ratti et al. 2005) che costituisce, ad oggi, un riferimento fondamentale nel campo della ricerca in merito a morfologia urbana e consumo energetico. I fattori che influenzano la performance energetica degli edifici appartengono a quattro categorie:

1. La geometria urbana
2. Le caratteristiche dell'edificio
3. L'efficienza degli impianti
4. Il comportamento degli occupanti

Baker e Steemers avevano individuato nel precedente lavoro "Energy and Environment in Architecture" (2000) la rilevanza di 3 dei fattori di incidenza nella determinazione della performance energetica: le caratteristiche dell'edificio, le caratteristiche dei sistemi impiantistici e il comportamento degli utenti (figura 57). Ratti si propone di valutare il contributo, mancante, del contesto urbano, proponendo uno studio comparativo della performance energetica in funzione della morfologia urbana, utilizzando le città di Tolosa, Londra e Berlino come casi di studio. Attraverso l'elaborazione di immagini DEMs ed il software energetico LT model (Steemers & Baker 2000), l'autore dimostra che la sola morfologia del contesto urbano influisce per almeno





**Figura 57** Peso relativo dei fattori che influenzano la performance energetica secondo Steemers e Backer (2000) e contributi mancante del contesto urbano investigato da Ratti (2005)

**Figura 58** Analisi energetiche sui DEMs per Londra, Tolosa e Berlino. Fonte: Ratti 2005,

**Figura 59** Incidenza della morfologia urbana nella determinazione della performance energetica secondo Ratti (2005) e Salat (2009). Fonte: Salt 2009,

un 10% sul consumo finale di un edificio non residenziale.

Salat (2009) applica lo stesso metodo alla città di Parigi individuando lo stesso fattore di incidenza della morfologia urbana sulla domanda energetica (figura 59).

Stando a questi studi, la morfologia urbana riveste un peso consistente nella determinazione della domanda finale, pari all'efficienza del sistema impiantistico. Va rilevato che tali conclusioni non sono generalmente valide, in quanto dipendono fortemente dal clima di riferimento. Nel caso dell'analisi di Ratti è stato utilizzato come clima di riferimento quello di Londra, nello studio di Salat quello di Parigi, pertanto possiamo affermare che sono risultati più rilevanti per quanto riguarda il contesto dei climi freddi e continentali.

Nel nord Europa l'accesso solare è garanzia di apporti termici e luminosi fondamentali durante la stagione invernale. J. Strømman-Andersen (2011) analizza l'impatto della geometria urbana sul consumo energetico e sul fattore di luce naturale per la città di Copenhagen, utilizzando il rapporto di verticalità del canyon (H/W) come parametro di riferimento. Il risultato rileva un'incidenza considerevole di tale variabile, che influisce fino al 30% sulla domanda energetica finale di un edificio per uffici e fino al 19% per destinazioni d'uso residenziali.

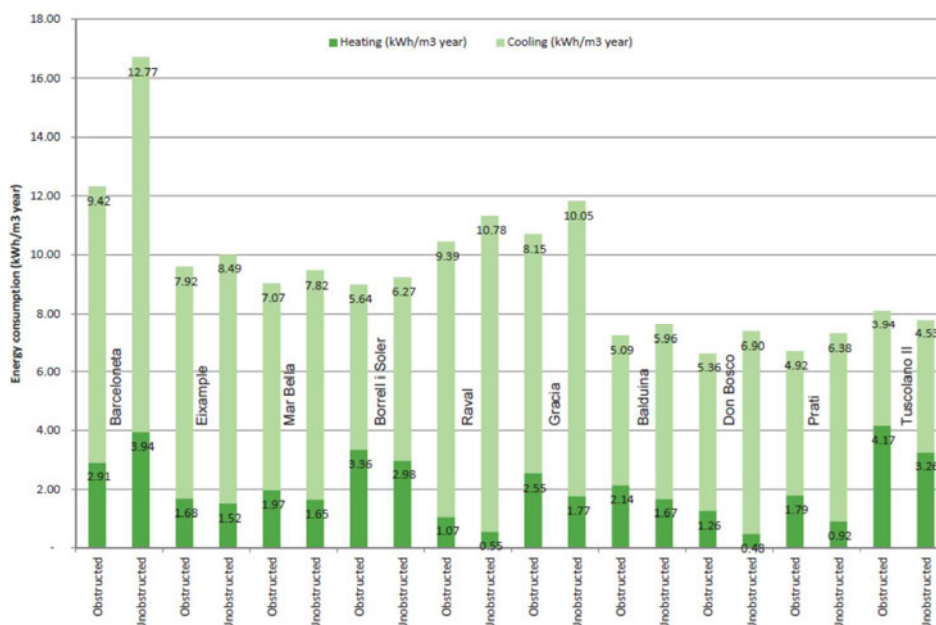
Contrariamente nel clima Mediterraneo Morganti (Morganti et al. 2012; Morganti 2013) evidenzia invece come la protezione dalla radiazione solare consente una notevole riduzione della domanda energetica, in quanto determina una diminuzione degli apporti termici estivi e, quindi, dei carichi di raffrescamento. Lo studio propone un'analisi comparativa della domanda energetica calcolata in assenza del contesto urbano o in presenza di esso, utilizzando un campione di tessuti edilizi individuati nelle città di Roma e Barcellona come casi di studio. La performance dell'edificio nel contesto urbano risulta favorevole per il clima Mediterraneo, perché la domanda di raffrescamento in questo contesto climatico supera abbondantemente quella per il riscaldamento, rappresentando l'obiettivo principale su cui agire per ottenere un beneficio energetico rilevante. Nel contesto mediterraneo, pertanto, un grado di compattezza e densità medio o elevato dell'edificio risulta positivo rispetto al comportamento termico



**Figura 60** Variazione del fattore di luce naturale in funzione della proporzione del canyon a Copenhagen. Fonte: Strøm-ann-Andersen & Saltrup, 2011



**Figura 61** Consumi energetici estivi ed invernali stimati in presenza o in assenza di ostruzione urbana. Fonte Morganti 2012



annuale.

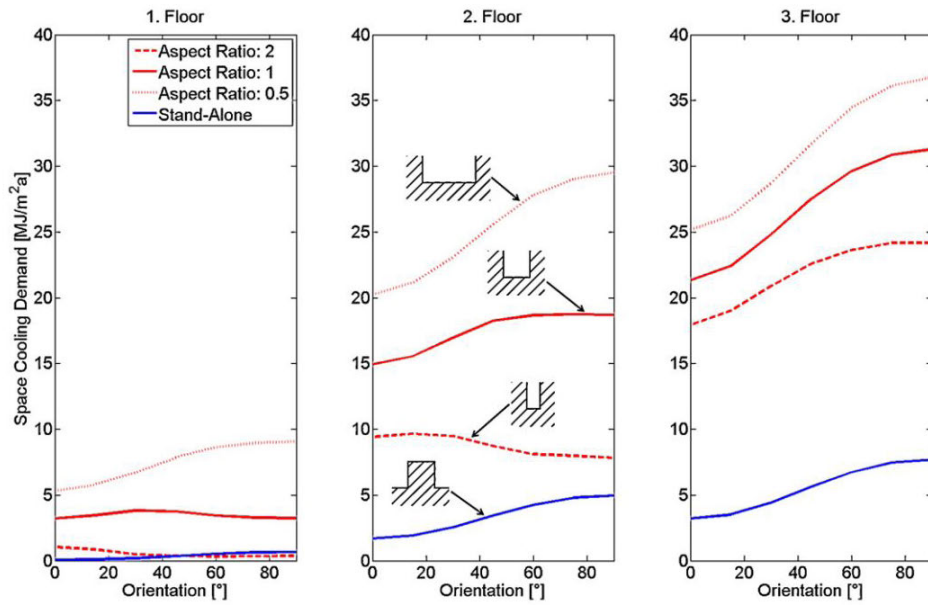
Un ulteriore studio dedicato ai climi caldi che merita attenzione è quello di Gupta (Gupta 1987), finalizzato a determinare il disagio termico al variare dell'esposizione solare. Gupta studia tre porzioni di diversi tipi di tessuto (A-PAVILION, B-COURT, C-STREET), arrivando alla conclusione che il tipo A presenta la migliore prestazione termica. Il risultato dipende sostanzialmente dall'estensione della superficie esterna totale dell'edificio, a parità di volume. Un edificio con maggiore superficie esposta presenta gradi di discomfort termico più elevati.

Tra gli studi più completi, volti ad analizzare la relazione tra morfologia e domanda energetica, va menzionato quello di Allegrini et al. (2012) che compara la domanda energetica di un edificio in ambito urbano rispetto ad un edificio isolato nel clima di riferimento di Basilea, Svizzera, tenendo in considerazione:

1. lo scambio radiativo tra edifici prospicienti
2. L'effetto dell'isola di calore per le temperature esterne
3. La riduzione dello scambio convettivo dovuto ad una riduzione della velocità del vento.

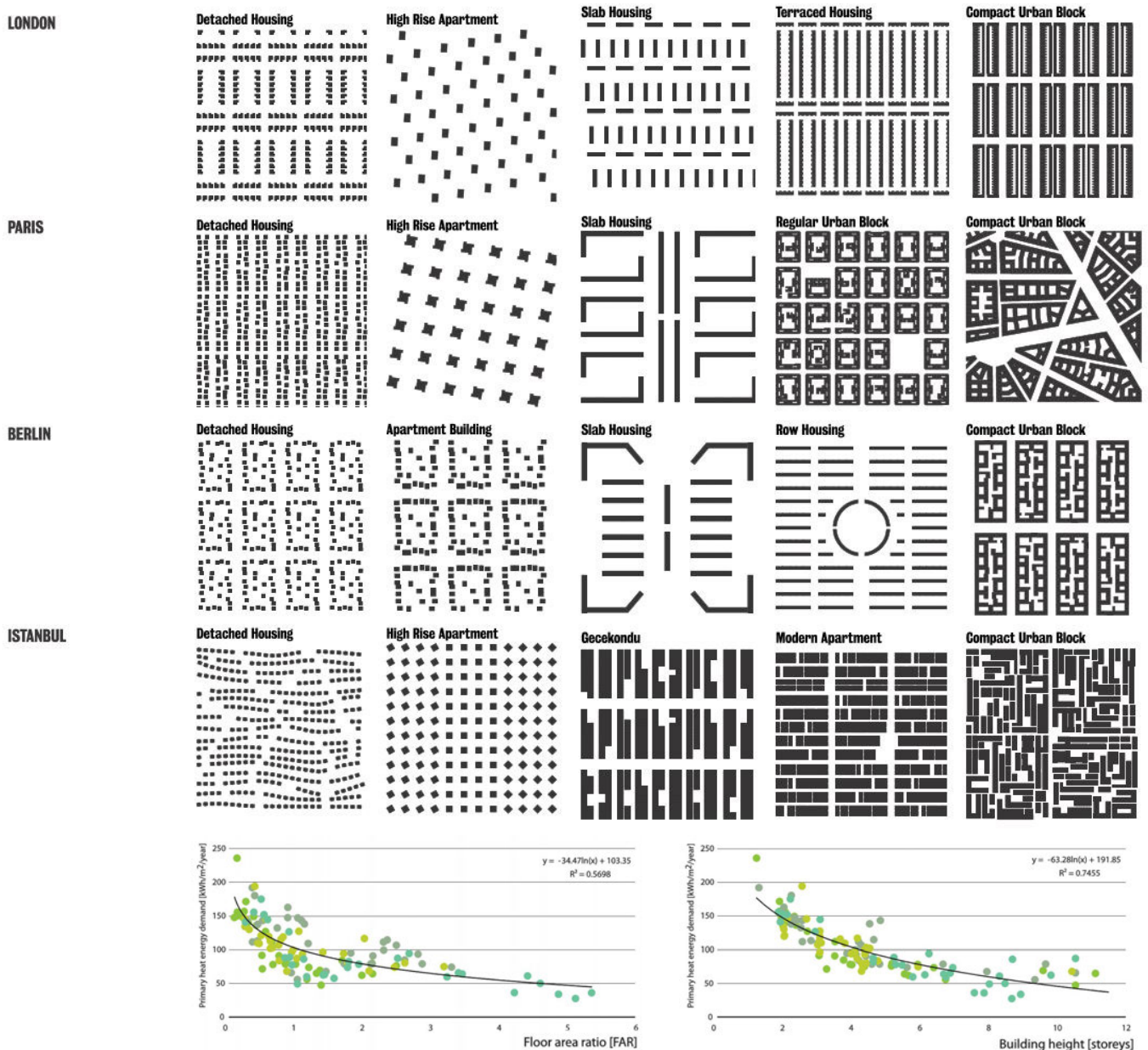
I risultati mostrano che in ambito urbano la domanda per il raffrescamento risulta maggiore che in ambito rurale ed è tanto più alta quanto più largo è il canyon. Inoltre la variazione della domanda energetica per il raffrescamento è maggiore rispetto a quella per il riscaldamento. Secondo gli autori, tale comportamento è determinato principalmente dallo scambio radiativo tra le superfici urbane. In un canyon urbano, la radiazione netta alle facciate è incrementata per effetto delle riflessioni multiple, mentre il raffreddamento notturno è rallentato dato il grado di ostruzione della volta celeste.

Infine un ottimo lavoro che individua relazioni affidabili tra i parametri di morfologia e densità e la domanda energetica a scala urbana è stato recentemente condotto presso la London School of Economics (Rode et al. 2014). La ricerca è volta ad analizzare e comparare la performance di morfologie urbane individuate in 4 città europee: Londra, Parigi, Berlino e



**Figura 62** Variazione della domanda di raffrescamento in funzione di differenti rapporti di verticalità del canyon nello studio di Allegrini et al. 2012

**Figura 63** In basso: modellazione della morfologia urbana per le città di Londra, Parigi, Berlino e Istanbul e analisi della performance energetica invernale in relazione all'altezza media degli edifici e all'indice FAR (Floor area ratio). Fonte: LSE Cities e EIFER Research, Rode 2014



Istanbul. Per ciascuna città vengono individuati 5 tessuti urbani come casi di studio, da cui vengono estratti modelli tipologici normalizzati che riproducono le caratteristiche dominanti delle configurazioni urbane corrispondenti (figura 63). A fronte del calcolo della domanda energetica per il riscaldamento di ciascun caso di studio, i risultati vengono analizzati alla ricerca di una relazione attendibile tra i parametri di densità ed il consumo energetico associato. I risultati confermano che la morfologia urbana determina una variazione della domanda di riscaldamento significativa, con un fattore pari a 6<sup>4</sup>. Le morfologie urbane più compatte risultano avere il comportamento migliore ed i parametri di densità, quali FAR (o FSI) e altezza media dell'edificato mostrano ottime relazioni rispetto alla performance termica.

### 2.2.5. Geometria urbana e accesso solare

Diversi fattori della morfologia degli insediamenti urbano hanno un effetto diretto sull'accesso solare, tra cui la densità dell'edificato, l'orientamento delle facciate e la proporzione dei canyon.

Lo studio di Oke del 1988 sulla relazione tra la proporzione del canyon e la performance climatica è seguito da quello di Arnfield (1990), nato con l'intento di dare un ulteriore contributo alla progettazione urbana sulla base di risultati ottenuti nel campo della climatologia. A tal fine, Arnfield presenta uno studio dell'accesso solare di canyon di differente proporzione e ne valuta il comportamento per diverse regioni climatiche. Come conclusione generale l'autore afferma che un intervallo di proporzione del canyon tra 0.4 e 0.6 per le regioni comprese tra latitudini di 35° and 55 ° risulta il migliore, consentendo una percentuale di irraggiamento della strada e delle pareti verticali rispettivamente uguale al 58-75% e 42-55% della radiazione totale incidente.

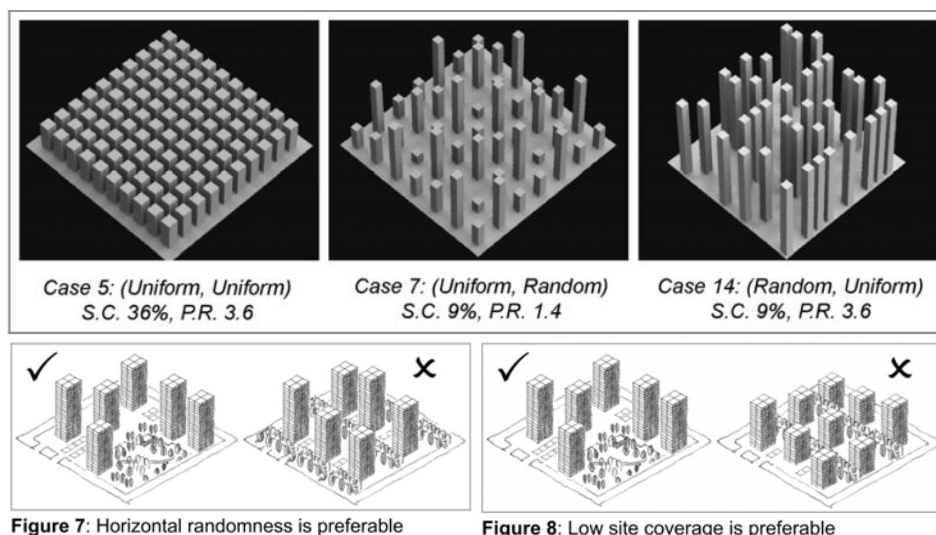
Più recentemente Cheng e Steemers (2006) analizzano la relazione tra forma del costruito, densità e potenziale solare di 18 configurazioni urbane. Come parametri di densità utilizzano il "plot ratio" ed il "site coverage"; il primo è dato dal rapporto tra la superficie totale edificata e la porzione di suolo a cui si riferisce, il secondo esprime il rapporto tra l'impronta dell'edificato e l'area urbana di riferimento<sup>5</sup>. Le 18 configurazioni sono determinate da tre classi di "plot ratio" e due di "site coverage" realizzate attraverso configurazioni uniformi e casuali dell'edificato sia in pianta che in alzato. Sulla base di questi modelli viene valutato, attraverso simulazioni, il fattore di luce naturale ed il potenziale fotovoltaico dell'involucro nel contesto climatico di San Paolo, Brasile. Come risultato si ottiene che una disposizione degli edifici del lotto "casuale", vale a dire non ordinata secondo logiche di parallelismo ed equidistanza e con altezze variabili, garantisce una migliore prestazione, in quanto permette l'ottimizzazione della radiazione solare incidente a terra, soprattutto nelle configurazioni con alto valore del "site coverage ratio".

Il risultato è stato recentemente confermato anche da altri studi. Curreli (2015) dimostra che un elevato grado di disomogeneità delle altezze degli edifici consente di ottimizzare il potenziale solare dell'involucro degli edifici a Barcellona. Vermeulen et al (2015) dimostra che una distribuzione dell'edificato "non tradizionale", ovvero che non segua criteri di parallelismo ed equidistanza permette di ottimizzare la captazione solare alle facciate degli edifici, consentendo notevoli miglioramenti soprattutto per latitudini elevate.

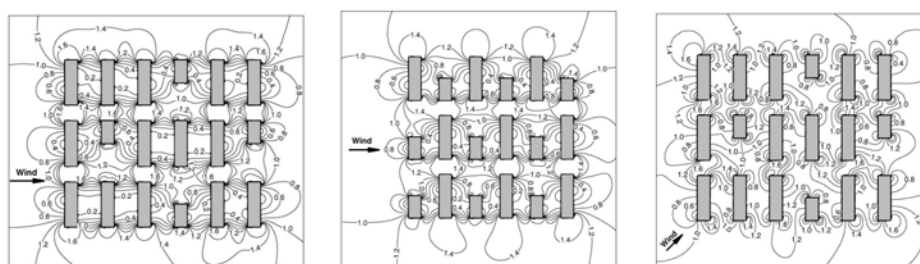
Uno studio analogo ai precedenti è stato applicato al progetto della "Ville Radieuse" di Le Corbusier, con il fine di validare o meno i presupposti teorici alla base della proposta del celebre architetto in merito all'ottimizzazione della radiazione solare (Montavon et al. 2006). L'ottimizzazione solare nel progetto di Le Corbusier doveva essere garantita dall'orientamento

4 Lo studio è stato condotto considerando come clima di riferimento quello di Parigi

5 Notare che tali parametri corrispondono ai, precedentemente menzionati FSI e GSI (Pont & Haupt 2009)



**Figura 64** Esempi di configurazioni dell'edificato uniformi o casuali utilizzati come caso di studio per l'analisi del fattore di luce naturale e del potenziale solare dell'involcro da Cheng et al. 2006. In basso indicazioni progettuali sulla base dei risultati



**Figura 65** Campo delle velocità del vento a 2m dal livello terra in funzione della disposizione degli edifici e della direzione del vento nello studio di Zhang et al. 2005

del piano secondo l'asse elietermico (ruotato di  $19^\circ$  rispetto a nord per il caso di Parigi) e attraverso la morfologia delle 4 tipologie di edifici presenti. Nello studio comparativo la performance delle tipologie studiate per la Ville Radieuse viene comparata con quella di una tipologia tradizionale della Parigi degli anni '20. I risultati dello studio smentiscono a tutti gli effetti le tesi del Maestro. Per quanto riguarda l'ottimizzazione dell'illuminazione naturale, le tipologie proposte da Le Corbusier presentano una prestazione minore durante il periodo invernale se comparata a quella della tipologia tradizionale dell'epoca.

Sempre in tema di ottimizzazione della captazione solare Compagnon (2004) presenta un metodo per determinare la percentuale di superficie utile (verticale e orizzontale) per l'applicazione di varie strategie solari (serre, fotovoltaico, solare termico e illuminazione naturale) a Friburgo, in Svizzera. Lo studio dimostra che la disponibilità di radiazione e luce naturale può variare considerevolmente a seconda delle diverse configurazioni proposte, determinando livelli di utilizzazione delle superfici fino all'83% per quanto riguarda lo sfruttamento della luce naturale e al 52% per strategie solari passive nella configurazione più favorevole. Analogamente, per Londra, Sarralde et al. (2015) esplorano le possibilità di configurazione dell'edificato a scala di quartiere che meglio consentono lo sfruttamento della radiazione solare. Gli autori individuano 8 variabili morfologiche, la cui combinazione ottimizzata potrebbe consentire un incremento del potenziale solare dei tetti di circa l'8% e delle facciate fino al 45%.

Infine Van Esch et al. (2012) analizzano l'effetto dell'ampiezza e l'orientamento dei canyon urbani sull'accesso solare e sulla possibilità di installare dispositivi di captazione e produzione di energia sugli edifici residenziali. Il risultato più interessante di questo studio è che in ambito urbano la larghezza del canyon risulta la variabile principale rispetto alla quantità di radiazione ricevuta dalle superfici, mentre l'orientamento non influisce in maniera sostanziale.



### 2.2.6. Geometria urbana e ventilazione

Il campo delle velocità dell'aria in un ambiente urbano è profondamente modificato dalla morfologia dell'edificato e dalla disposizione degli edifici rispetto alle direzioni prevalenti del vento. Il flusso d'aria intorno agli edifici ha un effetto diretto sul comfort termico e sulla qualità dell'aria, ma anche una ripercussione energetica significativa sugli edifici, in quanto modifica le possibilità di ventilazione naturale.

La conoscenza della distribuzione della velocità del vento all'interno della trama urbana potrebbe pertanto consentire una maggiore efficacia delle strategie di raffrescamento passivo, soprattutto nei climi caldi o in presenza di un'elevata isola di calore notturna.

Ratti et al. (2005) mostrano l'utilità dei DEMs per una caratterizzazione dell'ambiente urbano sotto il profilo dei "venti", al fine di estrapolare parametri utili, quali H/W del canyon o i coefficienti di rugosità, da utilizzare in simulazioni fluidodinamiche su larga scala

Zhang et al. (2005) approfondiscono invece la distribuzione delle velocità del vento in funzione di tre disposizioni alternative dell'edificato. I risultati mostrano che la ventilazione naturale può essere migliorata in configurazioni urbane che presentano un intervallo di variazione del rapporto di verticalità dei canyon basso, rispetto a configurazioni con rapporto di verticalità alto. Tuttavia il campo delle velocità all'interno delle trame risulta fortemente dipendente dalla direzione del vento ed i risultati delle simulazioni mostrano una variazione sostanziale per una direzione del vento inclinata di 45° rispetto alla facciata piuttosto che perpendicolare ad esse.

Un risultato simile è stato trovato da Palme et al. (2015), che attraverso simulazioni con il software Envi-met dimostrano che all'interno di una trama urbana la ventilazione è maggiormente influenzata dalla distribuzione degli edifici sul territorio rispetto alla densità del tessuto.

Alla luce dei numerosi studi presentati è possibile trarre alcune conclusioni.

La maggioranza degli studi sul rapporto tra la morfologia urbana e la performance energetica sono incentrati sull'analisi dell'accesso solare, dell'ottimizzazione del potenziale solare dell'involucro o sul fattore di luce naturale. In questo tipo di analisi si tende a non considerare l'effetto dell'isola di calore come ulteriore fattore di incidenza sulla domanda energetica, ad eccezione di pochi studi quale quello di Allegrini et al (2012a).

Gli studi sull'intensità dell'isola di calore in funzione della geometria urbana risultano invece contraddittori e poco generalizzabili, perché condotti in contesti climatici differenti ed incentrati su un unico parametro morfologico, lo SVFo il rapporto di verticalità del canyon, che, da soli, non sono sufficienti a descrivere l'ampio ventaglio di forme urbane che si incontra nelle città dell'area mediterranea.

Ciò che risulta chiaro dalla totalità di questi studi è che la densità dell'edificato comporta effetti contrastanti, che vanno adeguatamente studiati a seconda del clima di riferimento. Un incremento delle ostruzioni urbane comporta una diminuzione dell'accesso solare e della possibilità di captazione dell'energia termica, ma consente anche una protezione dalla radiazione solare estiva garantendo livelli di comfort più elevati nei climi caldi. Allo stesso tempo la densità urbana contribuisce all'innalzamento delle temperature, che comporta ripercussioni energetiche rilevanti in tutti i climi e soprattutto in quelli caldi.

L'analisi della performance energetica della morfologia urbana in clima Mediterraneo non può pertanto prescindere dal considerare in maniera integrata i due effetti, analizzando le ripercussioni sulla domanda energetica annuale e ponendo particolare attenzione al periodo estivo, che rappresenta la stagione più critica per il raggiungimento del comfort ed il contenimento dei consumi energetici.

- Adelard, L., Pignolet-Tardan, F., Mara, T., Lauret, P., Garde, F., & Boyer, H. (1998). Sky temperature modelisation and applications in building simulation. *Renewable Energy*, 15(1-4), 418–430. doi:10.1016/S0960-1481(98)00198-0
- Akbari, H., & Konopacki, S. (2005). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, 33(6), 721–756. doi:10.1016/j.enpol.2003.10.001
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. doi:10.1016/S0038-092X(00)00089-X
- Akbari, H., & Rose, L. S. (2001). *Characterizing the Fabric of the Urban Environment: A Case Study of Salt Lake City, Utah*. LBNL-47851. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Akbari, H., Bretz, S., Kim, D. M., & Hanford, J. (1997). Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings*, 25(2), 117–126.
- Alcoforado, M. J., & Andrade, H. (2006). Nocturnal urban heat island in Lisbon (Portugal): Main features and modelling attempts. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3), 151–159. doi:10.1007/s00704-005-0152-1
- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2012). Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy and Buildings*, 55, 823–832. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.013
- Andreou, E., & Axarli, K. (2012). Investigation of urban canyon microclimate in traditional and contemporary environment. Experimental investigation and parametric analysis. *Renewable Energy*, 43, 354–363. doi:10.1016/j.renene.2011.11.038
- APUR-Atelier Parisien d'Urbanisme. (2012). *Les Îlots de Chaleur Urbains à Paris*. Retrieved from [http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot\\_chaleur\\_urbains\\_paris\\_cahier1.pdf](http://www.apur.org/sites/default/files/documents/ilot_chaleur_urbains_paris_cahier1.pdf)
- Arnfield, a. J. (1990). Street design and urban canyon solar access. *Energy and Buildings*, 14, 117–131. doi:10.1016/0378-7788(90)90031-D
- Beckers, B., & Beckers, P. (2013). Sky vault partition for computing daylight availability and shortwave energy budget on an urban scale. *Lighting Research and Technology*, 46, 716–728. doi:10.1177/1477153513502507
- Beckers, B. (2007). Interpretación geométrica de la luz del cielo en el proyecto de arquitectura. *Informe Helio\_005\_es*. Retrieved from [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net)
- Bonacquisti, V., Casale, G. R., Palmieri, S., & Siani, a M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *The Science of the Total Environment*, 364(1-3), 1–13. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.097
- Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, 35(2), 343–347. doi:10.1016/j.renene.2009.07.017
- Bozonnet, E., Musy, M., Allard, F., Guarra-cino, G., & Chazelas, M. (2008). Concevoir et construire en milieu urbain Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. In Jac Fol (Ed.), *Futur de l'habitat* (pp. 139–154). Jean-Michel Place/PUCA.
- Brown, M. J., Grimmond, S., & Ratti, C. (2001). Comparison of Methodologies for Computing Sky View Factor in Urban Environments. In *International Society of Environmental Hydraulics Conf.* Tempe, AZ.
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., & Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), 269–281. doi:10.1080/19401493.2012.718797
- Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., & Britter, R. (2012). A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate. *Building and Environment*, 54, 116–125. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.023
- Bueno, B. (2012). *Study and prediction of the energy interactions between buildings and the urban climate*. PhD, Massachu-



- setts Institute of Technology.
- Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., & Britter, R. (2011). Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 140(3), 471–489. doi:10.1007/s10546-011-9620-6
- Cantelli, A., Monti, P., & Leuzzi, G. (2015). Numerical study of the urban geometrical representation impact in a surface energy budget model. *Environmental Fluid Mechanics*, 15(2), 251–273. doi:10.1007/s10652-013-9309-0
- Carreras, C., Marin, M., Vide, J. M., & Moreno, C. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 17, 51–77.
- Chandler, T. J. (1965). *The climate of London*. London: Hutchinson & CO LTD.
- Chao, Y., & Liang, C. (2011). Mitigating urban heat island effects in high-density cities based on sky view factor and urban morphological understanding: a study of Hong Kong. *Architectural Science Review*, 54(4), 305–315.
- Cheng, V., Steemers, K., Montavon, M., & Compagnon, R. (2006). Urban Form, Density and Solar Potential. In *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8 September*.
- Colacino, M., & Lavagnini, a. (1982). Evidence of the urban heat island in Rome by climatological analyses. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, 31(1-2), 87–97. doi:10.1007/BF02311344
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings*, 36(4), 321–328. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.009
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solimini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., ... Perini, L. (2005). Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 98(3), 390–399. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.009
- Conzen, M. R. G. (2004). *Thinking about urban form. Papers on Urban Morphology, 1932-1998*. (M. P. Conzen, Ed.). Oxford, UK: Peter Lang.
- Crawley, D. B. (2008). Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. *Journal of Building Performance Simulation*, 1(2), 91–115. doi:10.1080/19401490802182079
- Curreli, A. (2015). *El acceso solar a la escala del tejido urbano. El enfoque morfológico y el método de análisis comparativo aplicados al caso de Barcelona*. PhD Etsab, UPC.
- Curreli, A., & Coch, H. (2010). Solar access in the compact city: a study case in Barcelona. In *Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. "PALENC 2010"* (pp. 1–11). Rhodes Island
- de la Flor, F. S., & Dominguez, S. A. (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings*, 36(5), 403–413. doi:10.1016/j.enbuild.2004.01.050
- de Wilde, P., & Coley, D. (2012). The implications of a changing climate for buildings. *Building and Environment*, 55, 1–7. doi:10.1016/j.buildenv.2012.03.014
- Denes-Bejat, T., Bozonnet, E., & Calmet, I. (2009). Modeling the global warming effect on indoor door temperature peaks and cooling systems systems consumption. In *Eleventh International IBPSA conference* (pp. 117–122). Glasgow, Scotland.
- Dorer, V., & Allegrini, J. (2012). Urban Climate and Energy Demand in Buildings. Final Report. Retrieved from <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/stre-amfile.php?file=000000010715.pdf&name=000000290497>
- Dorer, V., Allegrini, J., Orehounig, K., Mononen, P., Upadhyay, G., Kämpf, J., & Carmeliet, J. (2013). Modelling the urban microclimate and its impact on the energy demand of buildings and building clusters. In *13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 3483–3489). Chambéry, France. Retrieved from [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p\\_1176.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2013/p_1176.pdf)

- Erell, E. (2008). The Application of Urban Climate Research in the Design of Cities. *Advances in Building Energy Research*, 2(1), 95–121. doi:10.3763/aber.2008.0204
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban Microclimate. Designing the space between buildings*. London: Earthscan Publishing.
- Fabrizi, R., Bonafoni, S., & Biondi, R. (2010). Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome. *Remote Sensing*, 2(5), 1400–1415. doi:10.3390/rs2051400
- Facility for Euro-Mediterranean Investment and Partnership. (2008). Study on Climate Change and Energy in the Mediterranean. Sophia Antipolis: Plan Bleu.
- Fanchiotti, A., Cornielo, E., & Zinzi, M. (2012). Impact of cool materials on urban heat islands and on buildings comfort and energy consumption. In *World Renewable Energy Forum, WREF 2012*. Denver, Colorado. Retrieved from [https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012\\_0176\\_full paper.pdf](https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0176_full%20paper.pdf)
- Gál, C. V. (2014). The influence of built form and vegetation on the canopy layer microclimate within urban blocks *Acta Climatologica et Chorologica*, 47 (48), 43-52, 43–52.
- Gartland, L. (2008). *Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas*. London: Earthscan
- Giannaros, T. M., & Melas, D. (2012). Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Research*, 118, 103–120. doi:10.1016/j.atmosres.2012.06.006
- Giannopoulou, K., Livada, I., Santamouris, M., Saliari, M., Assimakopoulos, M., & Caouris, Y. G. (2011). On the characteristics of the summer urban heat island in Athens, Greece. *Sustainable Cities and Society*, 1(1), 16–28. doi:10.1016/j.scs.2010.08.003
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, 43(10), 1583–1595. doi:10.1016/j.buildenv.2007.10.003
- Giridharan, R., Lau, S. S. Y., Ganesan, S., & Givoni, B. (2007). Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong. *Building and Environment*, 42(10), 3669–3684. doi:10.1016/j.buildenv.2006.09.011
- Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. (2004). Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 36(6), 525–534. doi:10.1016/j.enbuild.2003.12.016
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Glihah, O., Kruczek, B., Etemad, S. G., & Thibault, J. (2011). The effective sky temperature: An enigmatic concept. *Heat and Mass Transfer*, 47, 1171–1180. doi:10.1007/s00231-011-0780-1
- Grimmond, C. S. B., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., ... Voogt, J. (2010). Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 247–274. doi:10.1016/j.proenv.2010.09.016
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J. J., Belcher, S. E., ... Zhang, N. (2010). The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1268–1292. doi:10.1175/2010JAMC2354.1
- Gropius, W. (1930). Case alte, case medie o case basse? Conferenza tenuta al Terzo congresso internazionale per la Nuova Edilizia a Bruxelles, 1930. In G. Grassi (Ed.), *DAS NEUE FRANKFURT 1926-1931* (I.). edizioni DEDALO.
- Gupta, V. (1987). Thermal efficiency of building clusters: an index for non air-conditioned buildings in hot climates. In D. Hawkes (Ed.), *Energy and Urban Built*

- Form* (pp. 133–145). Butterworth-Heinemann. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-408-00891-4.50012-9>
- Hacker, J., Belcher, S., & Connell, R. (2005). *Beating the heat: keeping UK buildings cool in a warming climate. UKCIP Briefing Report*. Oxford.
- Hämmerle, M., Gál, T., Unger, J., & Matzarakis, A. (2011). Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3-4), 521–527. doi:10.1007/s00704-011-0402-3
- Hassid, S., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Linardi, A., & Klitsikas, N. (2000). The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings*, 32, 131–141.
- Hirano, Y., & Fujita, T. (2012). Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo. *Energy*, 37(1), 371–383. doi:10.1016/j.energy.2011.11.018
- Houet, T., & Pigeon, G. (2011). Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors--an application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 159(8-9), 2180–92. doi:10.1016/j.envpol.2010.12.027
- Howard, L. (1833). *The climate of London* (IAUC edition). Walkinstown, Dublin: SATTAL. Retrieved from [http://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward\\_Climate-of-London-V1.pdf](http://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf)
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338. doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.022
- Jusuf, S. K., & Hien, W. N. (2009). Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore. *Presented at the Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands*, Berkeley, California. Retrieved from <http://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/221410-jusuf-doc.pdf>
- Karaca, M., Tayanc, M., & Toros, H. (1995). Effects of urbanization on climate of Istanbul and Ankara. *Atmospheric Environment*, 29(23), 3411–3421.
- Kastendeuch, P. P. (2013). A method to estimate sky view factors from digital elevation models. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1574–1578. doi:10.1002/joc.3523
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H., & Kondo, H. (2003). Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy*, 76(4), 449–466. doi:10.1016/S0306-2619(03)00009-6
- Knowles, R. L. (1974). *Energy and form: an ecological approach to urban growth*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., & Mavrogianni, a. (2012). London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy and Buildings*, 47, 302–311. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.019
- Kolokotroni, M., & Giridharan, R. (2008). Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy*, 82(11), 986–998. doi:10.1016/j.solener.2008.05.004
- Kolokotroni, M., Zhang, Y., & Watkins, R. (2007). The London Heat Island and building cooling design. *Solar Energy*, 81(1), 102–110. doi:10.1016/j.solener.2006.06.005
- Kolokotroni, M., Giannitsaris, I., & Watkins, R. (2006). The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy*, 80(4), 383–392. doi:10.1016/j.solener.2005.03.010
- Kolokotsa, D., Psomas, a., & Karapidakis, E. (2009). Urban heat island in southern Europe: The case study of Hania, Crete. *Solar Energy*, 83(10), 1871–1883. doi:10.1016/j.solener.2009.06.018

- Konopacki, S., & Akbari, H. (2000). Energy Savings Calculations for Heat Island Reduction Strategies in Baton Rouge, Sacramento and Salt Lake City. *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Retrieved from <http://escholarship.org/uc/item/6020m5k9>
- Magli, S., Lodi, C., Lombroso, L., Muscio, A., & Teggi, S. (2015). Analysis of the Impact of Urban Heat Island on Building Energy Consumption. *Energy Environment Engineering*, 6, 91–99. doi:10.1007/s40095-014-0154-9
- March, L., & Martin, L. (1972). *Urban Space and Structures*. Cambridge, UK: University Press.
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liouise, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., ... Tulet, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3), 135–157. doi:10.1007/s00703-008-0289-4
- Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265
- Matuschek, O., & Matzarakis, A. (2010). Estimation of sky view factor in complex environment as a tool for applied climatological studies. Retrieved from [http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7\\_Matuschek\\_Matzarakis\\_534\\_539.pdf](http://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/BIOMET7_Matuschek_Matzarakis_534_539.pdf)
- Meadows, D. H., & Club of Rome. (1972). *The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.
- Ministero dell'ambiente. (2014). *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*.
- Ministero dell'Ambiente. (2013). *Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*.
- Montavon, M., Steemers, K., Cheng, V., & Compagnon, R. (2006). "La Ville Radieuse" by Le Corbusier once again a case study. In *PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Geneva, Switzerland.
- Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., & Carmeliet, J. (2012). Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. *Frontiers of Architectural Research*, 1(3), 197–228. doi:10.1016/j.foar.2012.05.002
- Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14, 705–710. doi:10.1002/joc.3370140609
- Morganti, M. (2013). *SUSTAINABLE DENSITY: Form, Built Environment, Energy*. PhD, UPC, SAPIENZA.
- Morganti, M., Coch, H., & Cecere, C. (2012). The effect of urban obstruction in Mediterranean climates: built form typology, density and energy. *Architecture, City and Environment*, 19, 13–26.
- Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Instruments and Observing Methods, Report No.*(WMO/TD-No. 1250).
- Oke, T. R. (2005). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3), 179–190. doi:10.1007/s00704-005-0153-0
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11, 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. London: Methuen.
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254. doi:10.1002/joc.3370010304
- Oxizidis, S., Dudek, a. V., & Papadopoulos, a. M. (2008). A computational method to assess the impact of urban climate on buildings using modeled climatic data. *Energy and Buildings*, 40, 215–223. doi:10.1016/j.enbuild.2007.02.018
- Palme, M., Clemente, C., & Isalgue, A. (2015). Climate Change and Urban



- Form : Simulation Studies in Temperate. In M. Cucinella, G. Pentella, A. Fagnani, & L. D'Ambrosio (Eds.), *PLEA2015 Architecture in (R) Evolution*. Bologna: Ass. Building Green Futures, Bologna.
- Papanastasiou, D. K., & Kittas, C. (2012). Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3-4), 407–416. doi:10.1007/s00704-011-0491-z
- Pelliccioni, a., Monti, P., Gariazzo, C., & Leuzzi, G. (2012). Some characteristics of the urban boundary layer above Rome, Italy, and applicability of Monin–Obukhov similarity. *Environmental Fluid Mechanics*, 12(5), 405–428. doi:10.1007/s10652-012-9246-3
- Pernigotto, G., & Gasparella, A. (2013). Extensive comparative analysis of building energy simulation codes : Heating and cooling energy needs and peak loads calculation in TRNSYS and EnergyPlus for southern Europe climates. *HVAC&R Research*, (May), 37–41. doi:10.1080/10789669.2013.794088
- Petenko, I., Mastrantonio, G., Viola, A., Argentini, S., Coniglio, L., Monti, P., & Leuzzi, G. (2011). Local Circulation Diurnal Patterns and Their Relationship with Large-Scale Flows in a Coastal Area of the Tyrrhenian Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 139(2), 353–366. doi:10.1007/s10546-010-9577-x
- Petralli, M., Massetti, L., & Orlandini, S. (2008). The influence of urban features on air temperature distribution. In *Climate change and urban design* (pp. 111–118). Oslo, Norway.
- Pont, M. B., & Haupt, P. (2010). *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*. Rotterdam, Netherlands: NAI Publishers.
- Pont, M. B., & Haupt, P. (2009). *Space, Density and Urban Form*. PhD, Technische Universiteit Delft.
- Ratti, C., Baker, N., & Steemers, K. (2005). Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings*, 37(7), 762–776. doi:10.1016/j.enbuild.2004.10.010
- Ratti, C., Di Sabatino, S., & Britter, R. (2005). Urban texture analysis with image processing techniques: winds and dispersion. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3), 77–90. doi:10.1007/s00704-005-0146-z
- Ratti, C., Raydan, D., & Steemers, K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35(1), 49–59. doi:10.1016/S0378-7788(02)00079-8
- Rode, P., Burdett, R., Robazza, G., & Schofield, J. (2014). *Cities and Energy: Urban morphology and heat energy demand*. LSE cities. London.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Bretz, S., Fishman, B. L., Kurn, D. M., Sailor, D., & Taha, H. (1995). Mitigation of urban heat islands : materials , utility programs , updates. *Energy and Buildings*, 22, 255–265.
- Rosenfeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., & Pomerantz, M. (1998). Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*, 28, 51–62.
- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, a., Clappier, a., ... Voogt, J. a. (2005). BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), 231–261. doi:10.1007/s00704-004-0117-9
- Saaroni, H., Ben-Dor, E., Bitan, A., & Potchter, O. (2000). Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel. *Landscape and Urban Planning*, 48(1-2), 1–18. doi:10.1016/S0169-2046(99)00075-4
- Salamanca, F., Martilli, A., & Yag?e, C. (2012). A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DE-SIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *International Journal of Climatology*, 32(15), 2372–2386. doi:10.1002/joc.3398
- Salat, S. (2009). Energy loads, CO 2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour. *Building Research & Information*, 37(5-6), 598–609.

doi:10.1080/09613210903162126

- Sanaleian, H., Tenpierik, M., Linden, K. Van Den, Mehdizadeh Seraj, F., & Mofidi Shemrani, S. M. (2014). Review of the impact of urban block form on thermal performance, solar access and ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 551–560. doi:10.1016/j.rser.2014.06.007
- Santamouris, M. (2014a). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. doi:10.1016/j.solener.2012.07.003
- Santamouris, M. (2014b). On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings*, 82, 100–113. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.022
- Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: The State of the Art. *Advances in Building Energy Research*, 1(March 2015), 123–150. doi:10.1080/17512549.2007.9687272
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, a., & Assimakopoulos, D. . (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy*, 70(3), 201–216. doi:10.1016/S0038-092X(00)00095-5
- Sarralde, J. J., Quinn, D. J., Wiesmann, D., & Steemers, K. (2015). Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London. *Renewable Energy*, 73, 10–17. doi:10.1016/j.renene.2014.06.028
- Sobrino, J. A., Oltra-carrió, R., Sòria, G., Jiménez-muñoz, J. C., Franch, B., Hidalgo, V., ... Paganini, M. (2013). Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9), 3177–3192. doi:http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2012.716548
- Steemers, K., & Baker, N. (2000). *Energy and Environment in Architecture. A technical Design Guide*. London: E & FN SPON.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Stewart, I., & Oke, T. (2009). classifying urban climate field sites by “ local climate zones ”: the case of Nagano , Japan. In *Proceedings of the seventh International Conference on urban climate*. Yokohama, Japan.
- Stiles, R., Wawrytko, B. G., Hagen, K., Trimmel, H., Loibl, W., Köstl, M., ... Feilmayr, W. (2014). Urban Fabric Types and Microclimate Response -Assessment and Design Improvement . Final Report. Vienna.
- Street, M., Reinhart, C., Norford, L., & Ochsendorf, J. (2013). Urban heat island in Boston – An evaluation of urban air- temperature models for predicting building energy use. In *Proceedings of BS2013:13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 1022–1029). Chambéry, France.
- Strømmand-Andersen, J., & Sattrup, P. a. (2011). The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains. *Energy and Buildings*, 43(8), 2011–2020. doi:10.1016/j.enbuild.2011.04.007
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25(2), 99–103. doi:10.1016/S0378-7788(96)00999-1
- Takebayashi, H., & Moriyama, M. (2012). Relationships between the properties of an urban street canyon and its radiant environment: Introduction of appropriate urban heat island mitigation technologies. *Solar Energy*, 86(9), 2255–2262. doi:10.1016/j.solener.2012.04.019
- Tayanc, M., & Toros, H. (1997). Urbanization effects on regional climate change in the case of four large cities of turkey. *Climatic Change*, 35(4), 501–524. doi:10.1023/A:1005357915441
- Theeuwes, N. E., Steeneveld, G. J., Ronda, R. J., Heusinkveld, B. G., van Hove, L. W. a., & Holtslag, a. a M. (2014). Sea-



- sonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (October), 2197–2210. doi:10.1002/qj.2289
- Unger, J. (2009). Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. *Environment and Pollution*, 36, 59–80.
- Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island : review and new approach. *Climate Research*, 27, 253–264.
- Van Esch, M. M. E., Looman, R. H. J., & De Bruin-Hordijk, G. J. (2012). The effects of urban and building design parameters on solar access to the urban canyon and the potential for direct passive solar heating strategies. *Energy and Buildings*, 47, 189–200. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.042
- Vandentorren, S., Suzan, F., Medina, S., Pascal, M., Maulpoix, A., Cohen, J. C., & Ledrans, M. (2004). Mortality in 13 French cities during the August 2003 heat wave. *American Journal of Public Health*, 94(9), 1518–1520. doi:10.2105/AJPH.94.9.1518
- Vermeulen, T., Knopf-Lenoir, C., Villon, P., & Beckers, B. (2015). Urban layout optimization framework to maximize direct solar irradiation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 51, 1–12. doi:10.1016/j.compenvurb-sys.2015.01.001
- Wong, N. H., Jusuf, S. K., Syafii, N. I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., & Manickavasagam, Y. V. (2011). Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*, 85(1), 57–71. doi:10.1016/j.solener.2010.11.002
- Wong, N. H., Jusuf, S. K., & Tan, C. L. (2011). Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 386–389. doi:10.1016/j.landurb-plan.2011.02.012
- Zachariadis, T., & Hadjinicolaou, P. (2014). The effect of climate change on electricity needs – A case study from Mediterranean Europe. *Energy*, 76, 899–910. doi:10.1016/j.energy.2014.09.001
- Zhang, A., Gao, C., & Zhang, L. (2005). Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(12), 891–904. doi:10.1016/j.jweia.2005.09.001
- Zhang, J., Heng, C. K., Malone-Lee, L. C., Hii, D. J. C., Janssen, P., Leung, K. S., & Tan, B. K. (2012). Evaluating environmental implications of density: A comparative case study on the relationship between density, urban block typology and sky exposure. *Automation in Construction*, 22, 90–101. doi:10.1016/j.aut-con.2011.06.011
- Zoulia, I., Santamouris, M., & Dimoudi, a. (2009). Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment*, 156, 275–292. doi:10.1007/s10661-008-0483-3



# **L'ISOLA DI CALORE NEL CONTESTO MEDITERRANEO**



# ANALISI SPERIMENTALE DELL'ISOLA DI CALORE A ROMA E BARCELLONA

Per una corretta valutazione del comportamento energetico dell'edificio nel contesto urbano occorre in primo luogo analizzare le modificazioni climatiche indotte dalla presenza dell'area urbanizzata, che si traducono principalmente in un incremento della temperatura rispetto alle aree rurali.

Il capitolo 3 della tesi presenta uno studio comparativo dell'intensità dell'isola di calore a Roma e Barcellona, che risulta determinante nella valutazione della prestazione energetica dell'edificio, soprattutto nel periodo estivo data la sempre maggiore rilevanza dei carichi per il raffrescamento nel clima Mediterraneo.

L'intensità e la variabilità del fenomeno è stata valutata mediante un'analisi dei dati di velocità e temperatura rilevati in stazioni meteorologiche presenti nelle due città e nelle zone rurali adiacenti. Le due città sono accomunate dal clima Mediterraneo e da una latitudine molto prossima, mentre differiscono principalmente per estensione e distribuzione dell'edificio sul territorio e per la vicinanza al mare.

Lo studio è volto a rilevare l'intensità media dell'isola di calore estiva ed invernale per un anno di riferimento in ciascuna città, utilizzando statistiche di dati orari su base annuale misurati da stazioni meteorologiche fisse. Per ciascuna città sono state individuate due stazioni meteorologiche urbane, collocate in quartieri centrali e densamente costruiti. Le stazioni rurali di riferimento sono collocate agli aeroporti Barcelona-El Prat e Roma-Ciampino. Tale scelta deriva dal fatto che gli aeroporti rappresentano le stazioni meteorologiche a cui si riferiscono le medie climatiche per le rispettive città. L'analisi ha permesso quindi di valutare quanto la temperatura urbana differisca da quella che, normalmente, viene utilizzata come input per le simulazioni energetiche del costruito.

Una seconda parte dello studio sperimentale analizza l'andamento delle temperature in differenti canyon urbani, sulla base di una campagna di misurazione della temperatura dell'aria alla quota stradale condotta durante 4 giorni estivi in due quartieri di Barcellona. La campagna è stata pianificata con lo scopo di evidenziare il comportamento termico di canyon urbani con rapporto di verticalità e orientamento differente e la differenza di temperatura dell'aria tra la quota stradale e la quota al di sopra dei tetti.

I dati raccolti sono utili sia per un riscontro sperimentare della consistenza del fenomeno nelle due città oggetto di studio, sia come termine di paragone e verifica per le successive fasi del lavoro, che prevedono l'uso di simulazioni numeriche del fenomeno e analisi energetiche del comportamento dell'edificio in ambito urbano.



### 3.1 Roma e Barcellona: aree metropolitane del contesto mediterraneo

#### 3.1.1 Clima di riferimento

Roma e Barcellona costituiscono un campo di indagine utile per valutare l'entità dell'isola di calore nel contesto Mediterraneo in quanto rappresentano due città, o meglio due metropoli, influenzate dall'effetto termoregolatore del mare e con un grado di soleggiamento annuo molto simile. Le due città sono classificate nella mappa di Köppen-Geiger come clima temperato, con estati calde ed aride (Csa = Warm Temperate, summer dry, hot summer). Il clima Mediterraneo si caratterizza per una rilevante variabilità stagionale, presentando estati caldi o molto calde e secche ed inverni freddi e piovosi. L'escursione media annua delle temperature è molto elevata e tanto più accentuata quanto maggiore la distanza dal mare. Roma e Barcellona si collocano ad una latitudine molto prossima, rispettivamente Roma a 41,9 °N e Barcellona a 41,4 °N pertanto godono degli stessi apporti solari durante l'anno. Le temperature di Barcellona, data la vicinanza al mare, presentano delle escursioni ridotte rispetto a Roma, sia nella media giornaliera che annua (figura 66). Il regime dei venti è moderato ma influenzato dal fenomeno della brezza marina nei mesi estivi. La gran parte delle precipitazioni sono concentrate nei mesi di settembre, ottobre e novembre in entrambe le città, anche se Barcellona presenta un regime di piovosità ridotto rispetto a Roma.

#### 3.1.2. Caratteristiche geografiche e morfologiche rilevanti

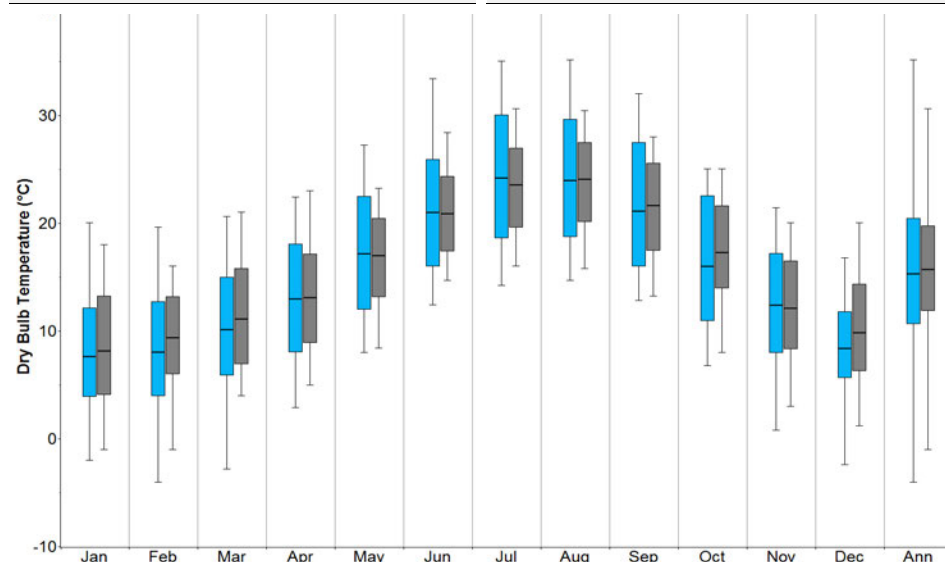
Barcellona rappresenta la città costiera più popolosa del Mediterraneo, con circa 1.6 milioni di abitanti nell'area centrale e quasi 5 milioni considerando l'intera area metropolitana. La città è geograficamente definita dalla linea della costa a Sud-Est e dalla catena montuosa "sierra

**Tabella 4** Medie climatologiche mensili (1981-2010) per Barcellona Aeroporto, fonte Agencia Estatal de Meteorologia -- AE-MET <http://www.aemet.es>

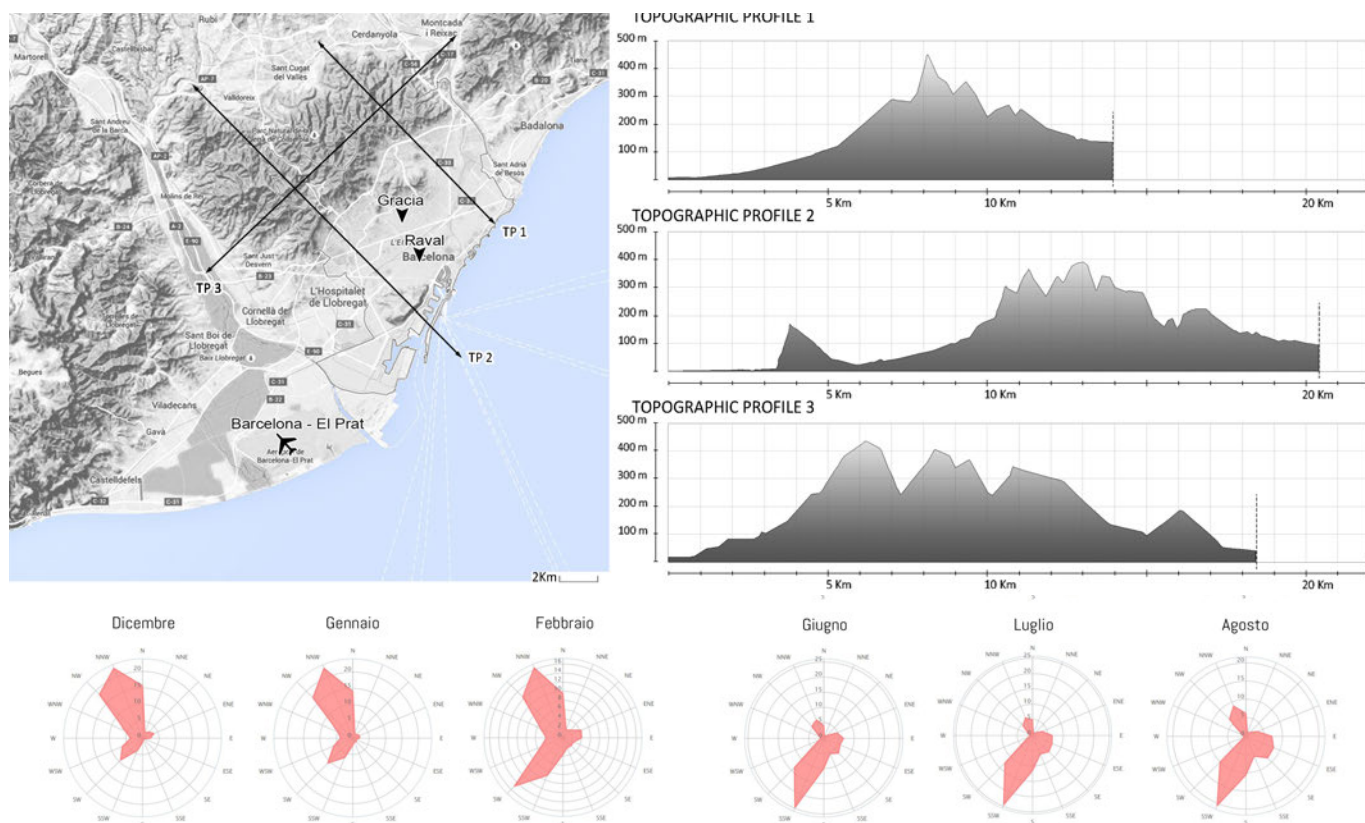
Dati climatici per Barcellona aeroporto (1981-2010)					
MESE	Temperature mensili			Precipitazioni	
	Min °C	Max °C	Media °C	Media mm	Giorni piovosi
1	9.2	13.6	4.7	37	3.7
2	9.9	14.3	5.4	35	4
3	11.8	16.1	7.4	36	4.5
4	13.7	18	9.4	40	5.1
5	16.9	21.1	12.8	47	4.7
6	20.9	24.9	16.8	30	3.6
7	23.9	28	19.8	21	1.8
8	24.4	28.5	20.2	62	4.5
9	21.7	26	17.4	81	5.2
10	17.8	22.1	13.5	91	6.3
11	13	17.3	8.6	59	5.1
12	10	14.3	5.7	40	4.4
ANNO	16.1	20.3	11.8	588	53.3

**Tabella 5** Medie climatologiche mensili (1961-1990) per l'osservatorio di Collegio Romano, fonte ENEA <http://clisun.casaccia.enea.it>

Dati climatici per Roma, osservatorio di collegio romano (1961-1990)								
MESE	Temperature mensili			Vento		Precipitazioni		
	Min °C	Max °C	Media °C	Direz Prev	V media	Media mm	Giorni piovosi	
1	4.0	11.1	7.5	N NE	3.7	75	9	
2	4.7	12.5	8.6	N S	3.9	65	8	
3	6.9	15.3	11.1	N S	3.9	67	9	
4	9.4	18.6	14.0	SO S	4.0	63	8	
5	13.1	23.2	18.1	SO S	4.0	51	6	
6	16.7	27.5	22.1	SO S	4.1	34	4	
7	19.2	30.5	24.9	SO O	4.3	14	2	
8	19.1	30.1	24.6	SO O	4.2	24	2	
9	16.6	26.6	21.6	SO N	3.7	64	5	
10	12.5	21.2	16.8	N S	3.4	113	9	
11	8.4	15.8	12.1	N S	3.7	108	10	
12	5.3	12.2	8.7	N NE	3.7	90	10	
Anno	11.3	20.4	15.8		3.9	768	82	



**Figura 66** Temperature medie mensili per Roma (celeste) e Barcellona (grigio), dati IWEA per Barcellona e IGDG per Roma, Fonte U.S. Department of Energy - <http://energyplus.net/weather>



de Collserola” a Nord-ovest. I margini Sud-Ovest e Nord-Est sono invece definiti dalle valli dei fiumi Llobregat e Besòs.

Il regime di ventilazione è influenzato dalla vicinanza del mare e dalla catena montuosa presente nell'entroterra. La città risente direttamente dell'effetto della brezza marina da maggio/ giugno fino a settembre, con una direzione principale dei venti da Sud Sud-Ovest. In Inverno la direzione prevalente è invece da Nord-Ovest.

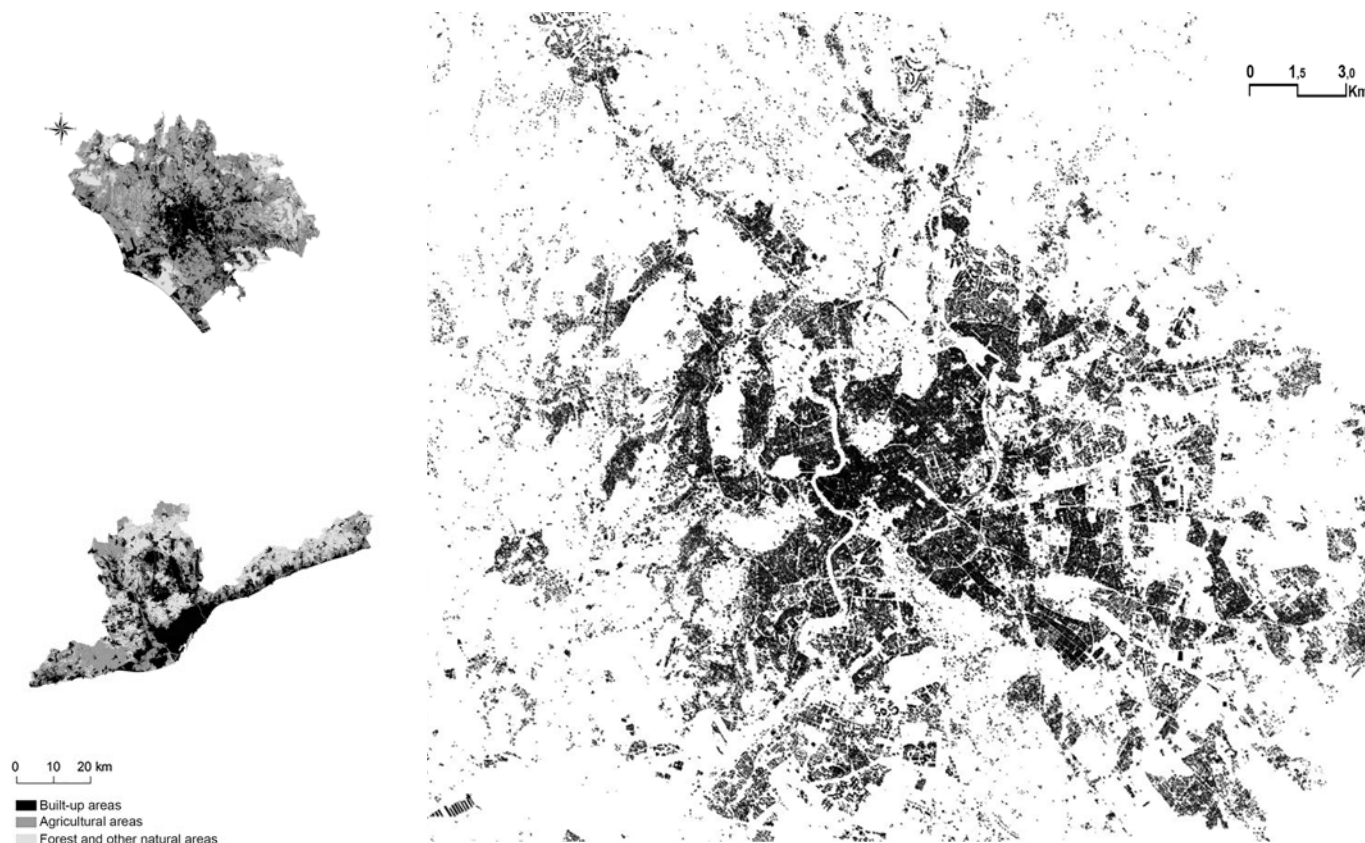
La struttura urbana è continua e compatta, impostata secondo una maglia stradale prevalentemente ortogonale, ad eccezione del denso centro storico delimitato dal tracciato dalle antiche mura Medioevali. L'altezza media dell'edificato è piuttosto uniforme nell'area centrale della città e compresa tra 15 e 25 metri circa (figura 69). La tipologia edilizia prevalente è continua e a corte, ma la dimensione degli isolati e l'orientamento della maglia è molto variabile e corrisponde a differenti periodi di costruzione e alle successive fasi di espansione che hanno caratterizzato la città. All'interno del tessuto edilizio le aree verdi ed i parchi sono molto scarsi. Nel centro città l'unica area verde importante è il Parc della Ciutadella. Altre aree verdi consistenti sono collocate a Nord (Parc Güell, Parc del Guinardó) e sul rilievo del Montjuic.

Roma (41° 50' N, 12° 30' E, 50 m slm.) è una delle città più popolate d'Europa, con circa 3,5 milioni di abitanti. Si trova circa 25 Km di distanza dalla costa del Mar Tirreno, collocata nella valle del fiume Tevere che la attraversa da Nord-sud. La città è circondata da rilievi consistenti in tutte le direzioni, ad eccezione del fronte ovest verso il mare. In particolare a Nord troviamo i monti della Tolfa (altezza circa 600m s.l.m.), a Est i monti Sabini (altezza oltre 1000m s.l.m.) e verso Sud i Colli Albani (altezza circa 800m s.l.m.) (Colacino & Lavagnini, 1982).

I venti sono moderati e provenienti principalmente da Nord durante l'inverno e da Sud-Ovest durante l'estate. Anche Roma risente in maniera consistente dell'effetto della brezza marina (Pelliccioni et al. 2012; Petenko et al., 2011), seppur in maniera meno diretta rispetto a Barcellona.

L'edificato romano si caratterizza per una estrema varietà di conformazioni urbane e morfologiche.

**Figura 67** In alto: Principali profili topografici di Barcellona, elaborazione dati estratti da Google Earth. In basso: Distribuzione annuale della direzione del vento (%). Dati riferiti alla stazione meteorologica dell'aeroporto Barcelona El Prat per gli anni 2000-2015, rappresentazione grafica <http://www.windfinder.com/windstatistics/barcelona>



**Figura 68** A sinistra : Roma e Barcellona, comparazione della proporzione di area costruita, area agricola e altre aree naturali. Fonte: Tombolini, 2015. A destra: distribuzione dell'edificato di Roma, elaborazione con il software gvSIG 2.2.

giche, distribuite con vari gradi di densità secondo una logica radiale. Il centro storico presenta un'edificazione estremamente densa, costituita di tessuti urbani compatti su maglia principalmente intricata (Cappuccitti, 2006; Ombuen & Filpa, 2012). Muovendosi in maniera radiale verso la periferia si distinguono chiaramente parti morfologicamente omogenee dell'edificato che rispecchiano i peculiari meccanismi romani di espansione e stratificazione, dall'epoca pre-moderna a quella moderna e contemporanea (Cappuccitti, 2006). Alla scala urbana l'edificato si distribuisce sul territorio in maniera altrettanto densa ma più discontinua rispetto a Barcellona, assumendo caratteri di più bassa densità e maggiore dispersione nelle aree periferiche, ma rimanendo concentrato e denso lungo le vie consolari. Tale distribuzione radiale dell'edificato consente alla città di mantenere un buon grado di superficie non edificata e verde anche nelle aree prossime al centro, principalmente concentrata in grandi parchi urbani quali villa Borghese al centro, Villa Ada a nord, Villa Pamphili a Ovest e il Parco della Caffarella a sud.

### 3.1.3. Studi sull'isola di calore a Roma e Barcellona

L'intensità e la distribuzione spaziale dell'isola di calore nelle due città sono già stati oggetto di studio e pubblicazione in epoche più o meno recenti.

Per quanto riguarda Barcellona, lo studio più approfondito si deve a Moreno Garcia e risale agli anni '90 (Carreras et al. 1990; Moreno-Garcia, 1994). Lo studio si fonda sulla comparazione delle temperature medie, massime e minime relative al periodo 1970-1984 osservate presso due stazioni meteorologiche fisse e su misurazioni di temperatura dell'aria lungo 5 sezioni (transect) significative della città (108 Km e 117 punti di misura). Le stazioni fisse di riferimento sono l'aeroporto di Barcelona El Prat come stazione rurale e una stazione meteorologica urbana sita nei pressi del vecchio porto della città (Dressanes). La differenza media annuale di temperatura tra il centro città e l'aeroporto risulta pari a  $1.4^{\circ}$ , mentre la differenza rispetto alle temperature minime pari a  $2.9^{\circ}\text{C}$ . Durante la notte la città risulta pertanto significativamente più calda rispetto all'aeroporto, con differenze che raggiungono la media di  $3.2$  e  $3.3^{\circ}\text{C}$  nei



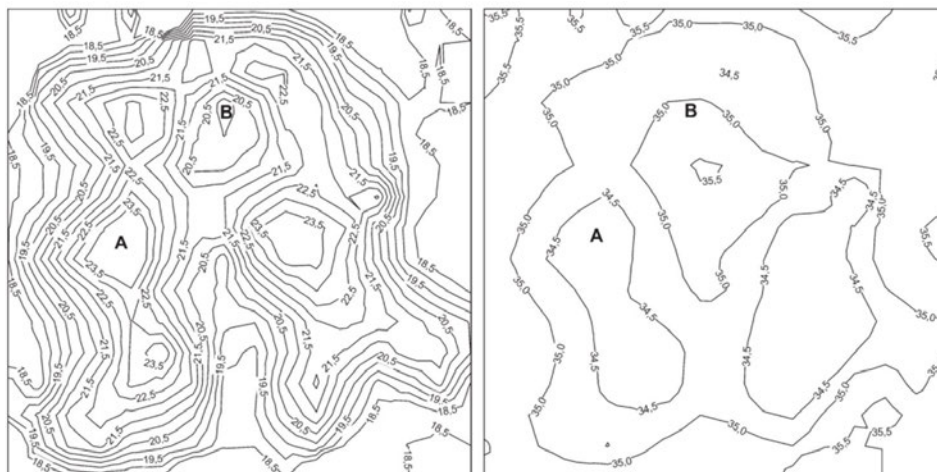




**Figura 69** Nella pagina accanto: altezza e distribuzione degli edifici in due aree centrali di Roma e Barcellona Elaborazione propria con il software gvSIG 2.2.



**Figura 70** Barcellona: isoterme nel 12 Febbraio 1986. Fonte: Moreno-Garcia, 1994



**Figura 71** Roma. isoterme delle temperature derivate da misurazioni effettuate a via Arenula (A) e Villa Ada, e dall'applicazione di un modello di canopia urbana. Fonte: Bonacquisti et al. 2006

mesi invernali (novembre-febbraio) e che si attestano intorno a  $2.5^{\circ}\text{C}$  nei mesi estivi. La differenza massima di temperatura rilevata supera gli  $8^{\circ}\text{C}$ . Le temperature dell'aria misurate lungo le 5 sezioni urbane, raccolte durante 54 notti comprese tra ottobre 1985 e luglio 1987, hanno permesso inoltre la costruzione di curve isoterme della distribuzione delle temperature urbane. Nella maggioranza dei casi (77,1%), l'isola di calore a Barcellona assume una conformazione tipica ad aree concentriche, con un "plateau" termico in corrispondenza dell'area centrale della città, in cui raggiunge l'intensità massima. Tale comportamento è spiegabile alla luce dell'elevata uniformità dell'area, strutturata sul tessuto reticolare di espansione novecentesco dell'Ensanche. Verso nord si registra un gradiente significativo della temperatura mentre un brusco calo caratterizza le valli del fiume Besos e Llobregat.

Per quanto riguarda Roma, i primi studi sull'isola di calore sono stati condotti da Colacino e Lavagnini (Colacino & Lavagnini, 1982). Confrontando le misurazioni di diverse stazioni meteorologiche urbane, suburbane e rurali per un periodo di 12 anni (1964-1975), gli autori individuano un'intensità di isola di calore, rispetto alle temperature minime, tendenzialmente maggiore in estate che in inverno. La differenza tra le temperature minime misurate nel centro di Roma (osservatorio di Collegio Romano) e la stazione rurale di Casalotti Nuovi raggiunge un massimo di  $4,3^{\circ}\text{C}$  ad agosto, mentre a gennaio a febbraio vale  $2,5^{\circ}\text{C}$ . A dicembre, invece, raggiunge un secondo massimo di  $4^{\circ}\text{C}$ . Nella media annuale, la città risulta  $3,3^{\circ}\text{C}$  più calda che il suo intorno rurale.

Uno studio più recente di Bonacquisti et al. (Bonacquisti et al. 2006) utilizza dati sperimentali di temperature per testare un modello di canopia urbana su Roma. Le temperature misurate fanno riferimento all'Osservatorio di Collegio Romano, alla stazione di Via Arenula e alla stazione nel parco di Villa Ada, considerata come stazione rurale di riferimento. L'incremento medio mensile massimo della temperatura si verifica ad agosto, raggiungendo  $4,3^{\circ}\text{C}$ , mentre nei mesi invernali si registrano differenze di temperatura più limitate.

Negli anni più recenti sono stati prodotti diversi studi; Cantelli et al. (2008) calcolano l'influen-

za del riscaldamento urbano sul campo delle velocità del vento mediante l'integrazione del modello TEB nel modello regionale RAMS (Regional Atmospheric Modelling System), confermando l'interazione tra l'effetto di brezza marina e di terra e l'isola di calore urbana a Roma. Pelliccioni et al. (2012) analizzano invece la struttura verticale dello strato limite urbano della città di Roma.

Infine Fabrizi et al. (2010) analizzano l'isola di calore urbana per mezzo di immagini satellitari e misurazioni a 2m dalla quota stradale, confermando un incremento medio estivo delle temperature di 3-4K, durante la notte.



### 3.2 Metodologia e fonte dei dati

Lo studio sperimentale quantitativo dell'isola di calore urbana a Roma e Barcellona si basa sul confronto di dati orari della temperatura dell'aria relativi a due stazioni meteorologiche urbane per ciascuna città e ad una stazione rurale di riferimento. Attraverso elaborazioni statistiche dei dati si presenta la comparazione delle temperature orarie medie mensili per ciascun sito di misurazione, con l'obiettivo di evidenziare l'andamento medio diurno dell'isola di calore estiva ed invernale nelle due città.

Le stazioni rurali sono individuate negli aeroporti delle rispettive città: Barcellona El Prat e Roma Ciampino. La scelta di questi siti come riferimento "rurale", sebbene non soddisfino pienamente le caratteristiche definite da Oke per una stazione rurale (Oke, 2006), risiede nel fatto che essi rappresentano le stazioni di riferimento per l'acquisizione delle medie climatiche su cui si basano i file meteorologici standard (Typical meteorological year) per le simulazioni energetiche (Bueno et al. 2013). Risulta pertanto interessante comparare le reali temperature urbane rispetto a quelle che normalmente vengono prese a riferimento nella pratica delle simulazioni energetiche.

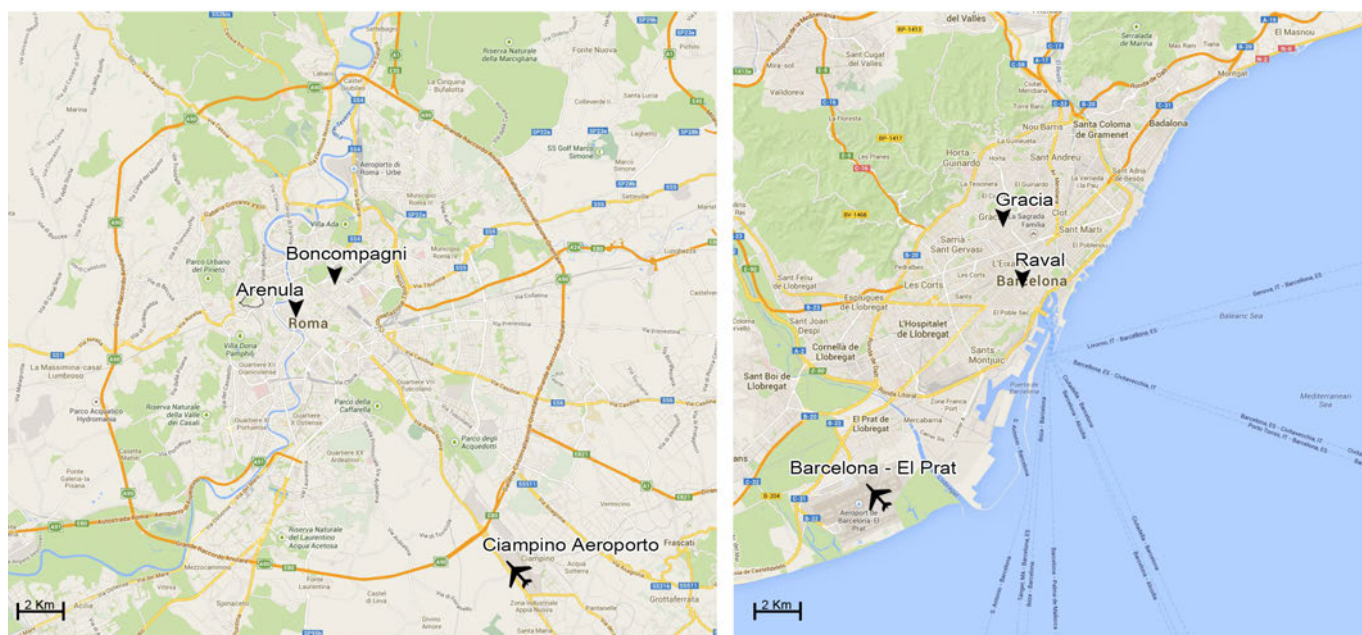
Le stazioni urbane sono rispettivamente Gracia e Raval per Barcellona e Arenula e Boncompagni per Roma, situate nel centro città e alla stessa distanza rispetto agli aeroporti (figura 72).

#### 3.2.1. Stazioni rurali di riferimento

La stazione rurale di Barcellona è localizzata all'aeroporto El Prat (WMO Station Number: 08181), a circa 13 Km in direzione sud-ovest dal centro della città, nelle vicinanze del delta del fiume Llobregat (figura 73). L'aeroporto è collocato a pochi metri dalla costa ed il sensore di temperatura in prossimità delle piste di atterraggio, a 6 m s.l.m. (1Km di distanza dalla costa). Per un raggio di circa 500 metri dal sensore la superficie è prevalentemente impermeabilizzata (asfalto). Tale caratteristica potrebbe parzialmente influire sulla misura della temperatura, mentre non vi sono ostacoli verticali che possono significativamente influenzare la direzione e la velocità del vento.

Per Roma la stazione rurale di riferimento è quella dell'aeroporto di Ciampino (coordinate

**Figura 72** Localizzazione delle stazioni meteorologiche di riferimento a Roma e Barcellona





geografiche 41.8 N ; 12.55 E , altitudine s.l.m. di 101 m). L'aeroporto è collocato a circa 14 Km dal centro città in direzione sud-est, lungo la via Appia. La strumentazione di rilevamento dati facente parte della Rete SNAM è posta in una zona semi rurale, lontana dalle piste di atterraggio (figura 73). Il sensore di temperatura si trova a circa 2 metri da terra.

I dati di temperatura, umidità, velocità e direzione del vento istantanei e storici per entrambe le stazioni sono disponibili dal sito [www.wunderground.com](http://www.wunderground.com) (Aeroporto di El Prat – codice stazione LEBL e aeroporto di Ciampino - codice stazione LIRA).

**Figura 73** A sinistra: Localizzazione della stazione meteorologica dell'aeroporto Barcellona El Prat (codice stazione WMO LEBL). A destra: Localizzazione della stazione meteorologica all'aeroporto di Roma Ciampino (codice stazione WMO LIRA)

### 3.2.2. Stazioni urbane di riferimento

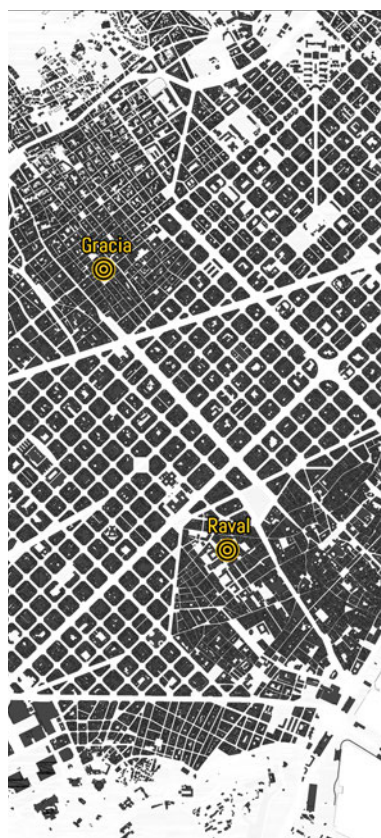
Le aree di riferimento delle stazioni meteorologiche fisse urbane verranno di seguito descritte evidenziandone le 4 categorie di variabili più significative in relazione al clima urbano, come suggerito da Oke (Oke, 2006), vale a dire la struttura morfologica urbana, le caratteristiche di permeabilità del terreno, i materiali urbani presenti ed il "metabolismo" dell'area (calore antropogenico mediamente prodotto). Ciascun sito di riferimento verrà quindi classificato secondo le "Zone Climatiche Urbane" (UCL – Urban Climatic Zones) definite da Oke e Stewart (Stewart & Oke, 2012).

#### BARCELLONA

Le stazioni urbane individuate a Barcellona si trovano nel cuore della città, nei quartieri Raval e Gracia.

**RAVAL** :Si colloca nel distretto "Ciutat Vella" di Barcellona, delimitato dal tracciato della seconda cinta muraria edificata a metà del XIV secolo e dalla Rambla, ma la struttura attuale del quartiere risale principalmente alle trasformazioni del XVIII e XIX secolo. Ad oggi rappresenta uno dei quartieri più densi della città, il cui compatto tessuto è costituito principalmente di edifici a corte su trama irregolare. La rete degli spazi pubblici conforma canyon estremamente

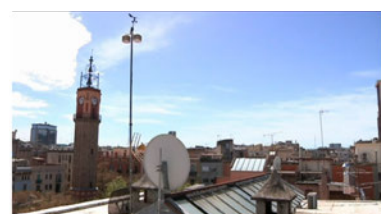




**Figura 74** Posizione delle stazioni meteorologiche a Barcellona: in alto la stazione di Gracia, in basso la stazione di Raval - METEOCAT



**Figura 75** La stazione meteorologica di Raval - METEOCAT



**Figura 76** La stazione meteorologica di Gracia

stretti, con un rapporto medio H/W pari a 3, ad eccezione della ampia e alberata Rambla del Raval. Il quartiere è prevalentemente pedonale, a destinazione d'uso prevalentemente residenziale nella porzione a Sud, mentre a Nord si concentrano attrezzature di rango urbano quali l'Università e vari musei. La presenza di vegetazione è estremamente scarsa. La stazione meteorologica dista dal mare soli 1.3 Km e circa 13 Km dall'aeroporto. Rispetto alla classificazione di OKE e Stewart ci troviamo nel caso di una zona climatica urbana 2 ("Compact midrise").

La stazione di Raval appartiene alla rete delle stazioni di METEOCAT – Agenzia meteorologica della Catalogna – ed è installata sulla copertura dell'edificio della Facoltà di Storia e Geografia dell'Università di Barcellona. Il sensore di temperatura (Platinum resistance thermometers PT100) è collocato in una capannina schermante a 1.5m rispetto al piano della copertura (33 m s.l.m.). L'accuratezza del sensore è  $\pm 0.3^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ . La stazione è dotata di anemometro che rileva la velocità del vento a 10m rispetto al piano della copertura.

**GRACIA:** è un distretto collocato a Nord rispetto alla Ciutat Vella. Originariamente nucleo storico al di fuori delle mura Medievali, viene inglobato nella città a seguito del rapido ed esteso processo espansivo del XIX secolo (Plan Cerdà), divenendo ben presto un popoloso quartiere a destinazione d'uso mista (attività produttive e residenza). Ad oggi si presenta con un tessuto compatto e denso, composto da edifici a corte su maglia piuttosto regolare. La maglia stradale conforma canyon stretti, con un rapporto di verticalità pari a circa 2.5. L'altezza media dell'edificato è molto variabile, compresa tra i 2 ed i 5 piani. La presenza di vegetazione è scarsa e concentrata prevalentemente nelle piazze del quartiere o lungo gli assi viari principali. Il quartiere è prevalentemente residenziale. La stazione meteorologica è posta sulla copertura di un edificio residenziale nei pressi della "Plaça de la Vila", a circa 4.2 Km dal mare e 14 Km dall'aeroporto. Anche il quartiere di Gracia rientra nella classificazione di UCZ 2.

La stazione di Gracia è una stazione meteorologica privata, i cui dati sono pubblicati nella rispettiva pagina web della rete di stazioni spagnole METEOCLIMATIC<sup>1</sup>. La stazione vanta nu-

1

I dati orari utilizzati nello studio sono stati forniti direttamente dal proprietario della stazione. Pagi-



merosi anni di rilevazione delle variabili climatiche nel quartiere. La misura della temperatura è effettuata mediante due sensori (Platinum wire thermistors) collocati in capannine schermanti a 4,5m dal piano della copertura di un edificio residenziale di 4 piani (rilevazione a 78m s.l.m.). La stazione è inoltre dotata di anemometro (4,5m rispetto alla copertura) e pluviometro.

## ROMA

Analogamente, per Roma, sono stati individuati due stazioni meteorologiche fisse collocate nel centro città (entro il perimetro delle mura Aureliane): la stazione di Via Arenula e la stazione di Via Boncompagni, entrambe facenti parte della rete di monitoraggio dell'Agenzia Regionale per la protezione dell'Ambiente (ARPA Lazio).

**VIA ARENULA:** La stazione di Via Arenula si trova nel centro storico di Roma (rione Pigna) in un quartiere oggi a destinazione d'uso mista, con presenza di uffici, commercio e residenza. Il tessuto intricato e compatto di impianto medievale conforma canyon urbani particolarmente alti e stretti, con un rapporto medio di verticalità pari a circa 2.6. Il quartiere rappresenta una delle aree più compatte, densamente edificate e centrali della città, a circa 13 Km da Ciampino Aeroporto. La scarsa vegetazione presente è concentrata perlopiù nei pressi del Tevere, che si incontra a circa 500 m di distanza rispetto al punto di misurazione. Secondo la parametrizzazione di Oke, siamo nel caso di UCZ 2.

I dati relativi alla stazione di Via Arenula sono stati misurati presso una centralina di monitoraggio della qualità dell'aria dotata anche di sensori meteorologici e sono relativi alla temperatura dell'aria a circa 2m rispetto alla quota stradale durante l'anno 2003, periodo in cui la centralina si trovava a largo Arenula (oggi è stata spostata a piazza Cairolì).

**VIA BONCOMPAGNI:** La seconda stazione di rilevamento è sita in Via Boncompagni, al confine tra il rione Ludovisi ed il rione Sallustiano. Il tessuto dell'area risale alle espansioni di inizio Novecento, presenta una densità dell'edificato mediamente alta, paragonabile all'area

na web della stazione [http://www.meteoclimatic.net/perfil/ESCAT0800000008012A?screen\\_width=1920](http://www.meteoclimatic.net/perfil/ESCAT0800000008012A?screen_width=1920).

**Figura 77** Posizione delle stazioni meteorologiche a Roma: in alto la stazione di Via Boncompagni, in basso la stazione di Via Arenula



di Via Arenula, ma caratterizzata da una maglia stradale più ampia e regolare, costituito principalmente da edifici alti circa 7 piani. Il rapporto medio di verticalità dei canyon di circa 1.5. La presenza di vegetazione e alberature è scarsa nelle aree limitrofe all'edificio che ospita la stazione meteorologica, sebbene a poca distanza in direzione Nord l'area confina con il parco di Villa Borghese.

La stazione meteorologica di Via Boncompagni appartiene alla rete micrometeorologica di Arpa Lazio ed è installata sulla copertura dell'edificio dell'Arpa. La stazione è dotata di anemometro ultrasonico (USA1 SCIENTIFIC), Pluviometro (VRG 101), Termoigrometro (HMP 45AC) e Radiometro (CNR1). I dati relativi alla temperatura oraria misurati presso la stazione sono stati forniti dall'Arpa per l'anno 2013.

**Figura 78** Caratteristiche delle stazioni meteorologiche urbane di riferimento

Caratteristiche delle 4 stazioni urbane							
Stazione	Dist Aeroporto (Km)	Dist mare (km)	H sensore (m)	Posizione	Rapporto di copertura	H/W	H media (m)
<b>Raval</b>	13	1.3	33 s.l.m.	copertura (1.5m)	0.63	3	17
<b>Gracia</b>	14	4.2	70 s.l.m.	copertura (4.5 m)	0.55	2.5	15
<b>Arenula</b>	13	-	31 s.l.m.	strada (2m)	0.5	2.6	20
<b>Boncompagni</b>	13	-	72 s.l.m.	copertura	0.45	1.5	20

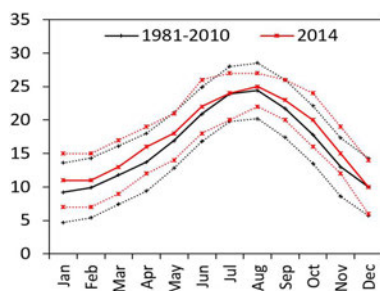
### 3.2.3. Discussione dei risultati

L'intensità media di UHI è definita come la differenza oraria media mensile tra le temperature osservate nella stazione rurale e nelle stazioni urbane. Tale intensità è variabile durante l'arco della giornata. Verrà pertanto presentato il ciclo diurno delle temperature medie nei mesi invernali ed estivi per ciascun sito urbano di riferimento, per rappresentare la variabilità del fenomeno durante tutto l'anno. Per ciascun sito verrà inoltre evidenziata l'intensità media e massima di UHI mensile e le differenze riscontrate tra le misurazioni effettuate in copertura e al livello stradale.

### INTENSITÀ DELL'ISOLA DI CALORE A BARCELLONA

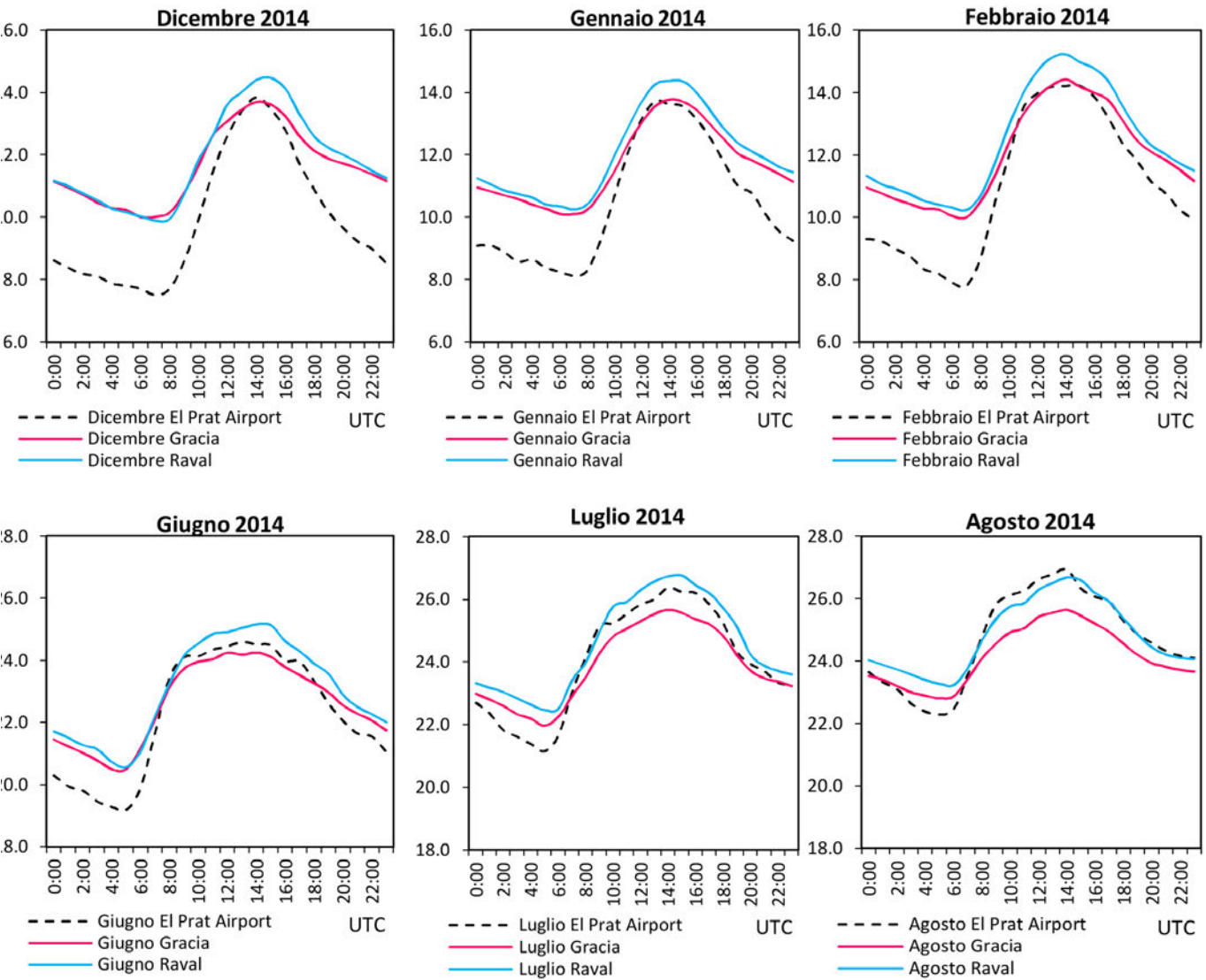
La figura (79) mostra il confronto tra le temperature medie, massime e minime mensili osservate all'aeroporto El Prat durante l'anno 2014 e rispetto alle medie climatiche del periodo 1981-2010. Nel 2014, le temperature minime sono tendenzialmente superiori alla media, durante tutto l'anno. Lo stesso avviene per le temperature medie ed in misura minore per le massime, ad eccezione del periodo estivo. Nei mesi di luglio e agosto 2014, infatti, le temperature massime risultano leggermente inferiori rispetto alla media.

Nei grafici in figura 80 si presenta l'andamento orario delle temperature medie mensili a Raval e Gracia rispetto all'aeroporto, nei mesi invernali (gennaio, febbraio e dicembre 2014) ed estivi (giugno, luglio e agosto 2014). Lo standard di tempo utilizzato nei grafici è il tempo universale coordinato (UTC); il fuso orario locale corrisponde a UTC + 1 per i mesi invernali, e UTC+2 per i mesi estivi.



**Figura 79** Barcellona: Temperatura media, massima e minima del 2014 rispetto alle medie relative agli anni 1981-2010. Dati .wunderground.com e AEMET





**Figura 80** Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto (linea nera tratteggiata), nella stazione di Raval (linea azzurra) e di Gracia (linea rossa) nel 2014

Raval 2014						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
UHI media	2.0	1.5	1.4	0.8	0.6	0.1
UHI massima	2.8	2.2	2.4	1.7	1.3	1.0
orario max (UTC)	23:00	23:00-3:00	6:00-7:00	3:00	5:00	4:00-5:00

Gracia 2014						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
UHI media	1.7	1.2	1.0	0.4	-0.1	-0.5
UHI massima	2.6	2.0	2.2	1.3	0.8	0.5
orario max (UTC)	23:00-2:00	3:00 - 7:00	7:00	1:00-6:00	2:00-5:00	4:00-5:00

**Tabella 6** Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Raval nel 2014

**Tabella 7** Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Gracia nel 2014

## ISOLA DI CALORE INVERNALE

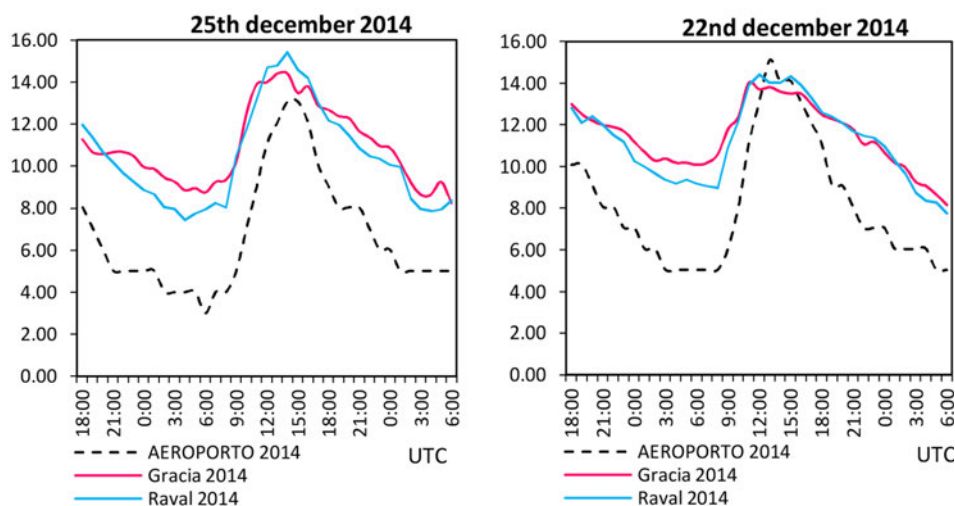
Nei mesi di dicembre, gennaio e febbraio l'effetto dell'isola di calore a Barcellona è evidente, soprattutto durante la notte, con intensità simili nei due siti analizzati (Figura 80).

Come prevedibile, l'intensità di UHI varia durante il giorno, risultando più forte durante la notte e più debole o addirittura assente durante la seconda parte della mattinata ed il primo pomeriggio. Nei tre mesi invernali, l'andamento è molto simile: L' UHI è assente o molto debole tra le 12:00 e 16:00, inizia a crescere in modo significativo dalle 18:00 fino a raggiungere la sua massima intensità tra le 21:00 e le 7:00 del mattino. Dalle 08:00 del mattino, momento in cui le temperature tornano a crescere in virtù del sorgere del sole, la differenza di temperatura tra città e aeroporto diminuisce, fino a raggiungere un minimo a mezzogiorno. Questa tendenza è in linea con gli studi e le teorie precedenti (Oke, 1987; Rotach et al., 2005). L'isola di calore media mensile varia tra i 2 °C di Dicembre e 1.4 °C a Febbraio.

L'intensità media massima si ha nel mese di dicembre, alle 23:00, raggiungendo un valore medio mensile di 2,8 °C e 2,6 °C rispettivamente nel quartiere Raval e Gracia. Nel 2014 dicembre è stato il mese più freddo per Barcellona. I giorni 22 e 25 dicembre sono stati i giorni in cui si è osservata l'intensità massima di UHI, che ha raggiunto 5,8 °C alla stazione di Gracia, sia il 22 dicembre alle ore 9:00 che il 25 dicembre alle 6 del mattino.

Dai grafici è possibile notare che le temperature rilevate a Gracia risultano inferiori rispetto a Raval, in particolar modo tra le 12:00 e le 16:00. Questa differenza potrebbe essere attribuita alla diversa posizione dei sensori di temperatura rispetto al piano della copertura, situati a 1,5 m nel caso di Raval e a 4,5 m nel caso di Gracia. Poiché la differenza tra le due misurazioni si registra durante le ore di massimo soleggiamento, è possibile che le misurazioni della stazione di Raval risentano in maniera più consistente del riscaldamento della superficie del tetto dell'edificio.

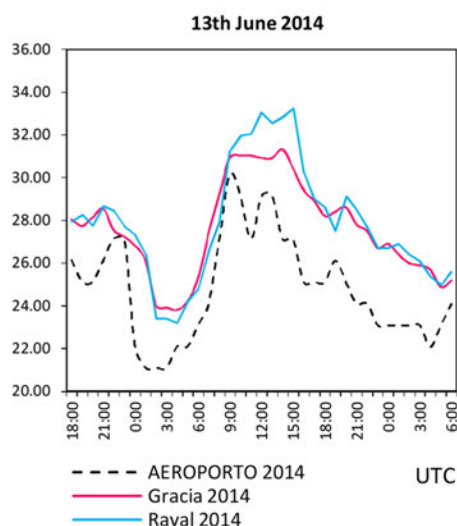
**Figura 81** Massima intensità dell'isola di calore misurata durante i mesi invernali del 2014 a Barcellona



## ISOLA DI CALORE ESTIVA

Durante il periodo estivo dell'anno di riferimento l'isola di calore risulta molto meno pronunciata. La differenza tra le temperature urbane e quelle dell'aeroporto è molto bassa e presente solo durante la notte inoltrata, tra l'1:00 e le 6:00. L'intensità media massima di isola di calore si ha nel mese di giugno, raggiungendo 1,7 °C e 1,3 °C a Raval e Gracia rispettivamente, alle 3 del mattino. Il 13 giugno alle ore 3:00 si osserva la massima intensità estiva, pari a 6,1 °C a Raval e 3.1 °C a Gracia.

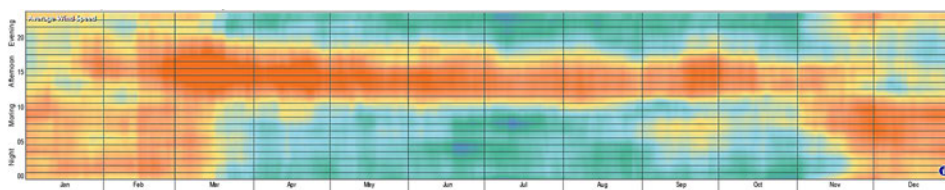
L'isola di calore media massima nei mesi di luglio e agosto tende a diminuire: ad agosto, il



**Figura 82** Massima intensità dell'isola di calore misurata durante i mesi estivi del 2014 a Barcellona

Il mese più caldo del 2014, raggiunge a Raval un massimo di 1°C ed a Gracia 0.5 °C. In particolare nel mese di agosto le temperature nel centro della città sono uguali o inferiori rispetto all'aeroporto.

Va rilevato che l'escursione termica giornaliera a Barcellona è molto limitata in estate (circa 5°C all'aeroporto), in quanto la città risente in maniera diretta dell'effetto benefico della brezza marina nelle ore più calde della giornata (figura 83).

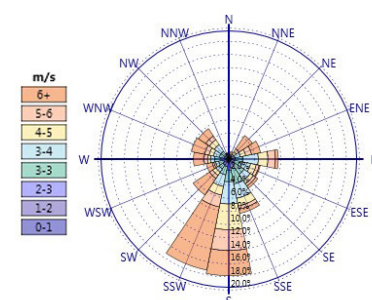


In città l'escursione è ancora più piccola, in quanto all'effetto mitigatore del mare si aggiunge l'effetto dell'isola di calore notturna.

Inoltre vale la pena evidenziare che nel periodo estivo la temperatura nella stazione Raval sono sempre superiori alla stazione Gracia. Questo può essere spiegato tenendo conto di due fattori: 1) la posizione dei sensori rispetto al livello del tetto, come precedentemente evidenziato, 2) le caratteristiche morfologiche del contesto urbano dei due siti. In effetti, tenuto conto della direzione prevalente del vento durante il giorno e dell'area di riferimento per ciascuna stazione (Oke, 2006) l'area del Raval risulta caratterizzata da un rapporto di copertura maggiore (63% contro 55%) e da un'altezza media dell'edificato maggiore (17-20 m contro 12-15 m). Le diverse caratteristiche di densità e morfologia dei due distretti possono pertanto spiegare la differenza di temperatura tra Raval e Gracia, sia in inverno che in estate.

È invece da escludere che tale differenza sia determinata dall'altezza di misurazione delle due stazioni. Sebbene il sensore di Raval si trovi a 33m slm mentre quello di Gracia a 70m slm, tale differenza non comporta un abbassamento delle temperature alla stazione di Gracia in virtù della maggiore altezza<sup>2</sup>.

Le considerazioni effettuate sull'andamento dell'isola di calore a Barcellona sono in accordo con le conclusioni pubblicate da Moreno-Garcia (1994). La ricercatrice aveva individuato un'isola di calore notturna più pronunciata in inverno rispetto all'estate, ed un gradiente di temperatura dal distretto centrale (Ensanche) verso il nord della città (Gracia e oltre).



**Figura 83** A sinistra: andamento della velocità media oraria del vento nell'arco dell'anno 2014 all'Aeroporto di Barcellona. A destra: direzione prevalente del vento (percentuale) nella fascia oraria tra le 12 e le 18. Nei mesi estivi, in tale fascia oraria, si assiste ad un repentino aumento della velocità del vento con direzione Sud-Sud-ovest, che corrisponde all'innesco del fenomeno di brezza. Fonte: dati sperimentali elaborati con Autodesk Vasari

<sup>2</sup> Per verificare tale assunzione, le temperature assolute sono state trasformate in potenziali, sulla base dei dati di pressione orari disponibili per entrambe le stazioni. La differenza tra temperature assolute e potenziali è dell'ordine di 0.1 °C, che risulta ininfluente ai fini della comparazione.

## INTENSITÀ DELL'ISOLA DI CALORE A ROMA

I grafici in figura 84 e 85 riportano l'andamento medio della temperatura giornaliera nei tre mesi invernali (gennaio, febbraio e dicembre) ed estivi (giugno, luglio e agosto) del 2003 per via Arenula e del 2013 per Via Boncompagni, in relazione alle corrispondenti temperature rilevate all'aeroporto di Ciampino. Gli orari sono espressi nel formato UTC (tempo coordinato universale); occorre aggiungere un'ora nei mesi invernali e due ore nei mesi estivi per ottenere l'orario locale.

L'isola di calore è evidente in entrambe le aree analizzate, ma con andamento differente in virtù del fatto che sebbene le due stazioni siano collocate in zone omogenee rispetto alla classificazione UCZ e in posizione analoga rispetto alla città (posizione centrale, edificato denso e compatto), sono però collocate una al livello della strada (via Arenula) e una in copertura (via Boncompagni). La stazione di Via Arenula risente pertanto dell'effetto dell'ombreggiamento degli edifici, sia rispetto alla radiazione solare che rispetto alla velocità del vento. Inoltre, collocandosi nel punto più basso del canyon, risente del massimo effetto del trapping radiativo, sia diurno che notturno nonché, in maniera piuttosto diretta, della presenza di fonti di calore antropogenico quali il traffico veicolare ed il calore di scarto immesso dagli impianti degli edifici. La stazione di Via Boncompagni, invece, è rappresentativa dell'andamento delle temperature nel substrato di rugosità al di sopra dell'altezza media degli edifici. Alla luce di tali considerazioni è possibile interpretare l'andamento delle temperature nei due siti di riferimento.

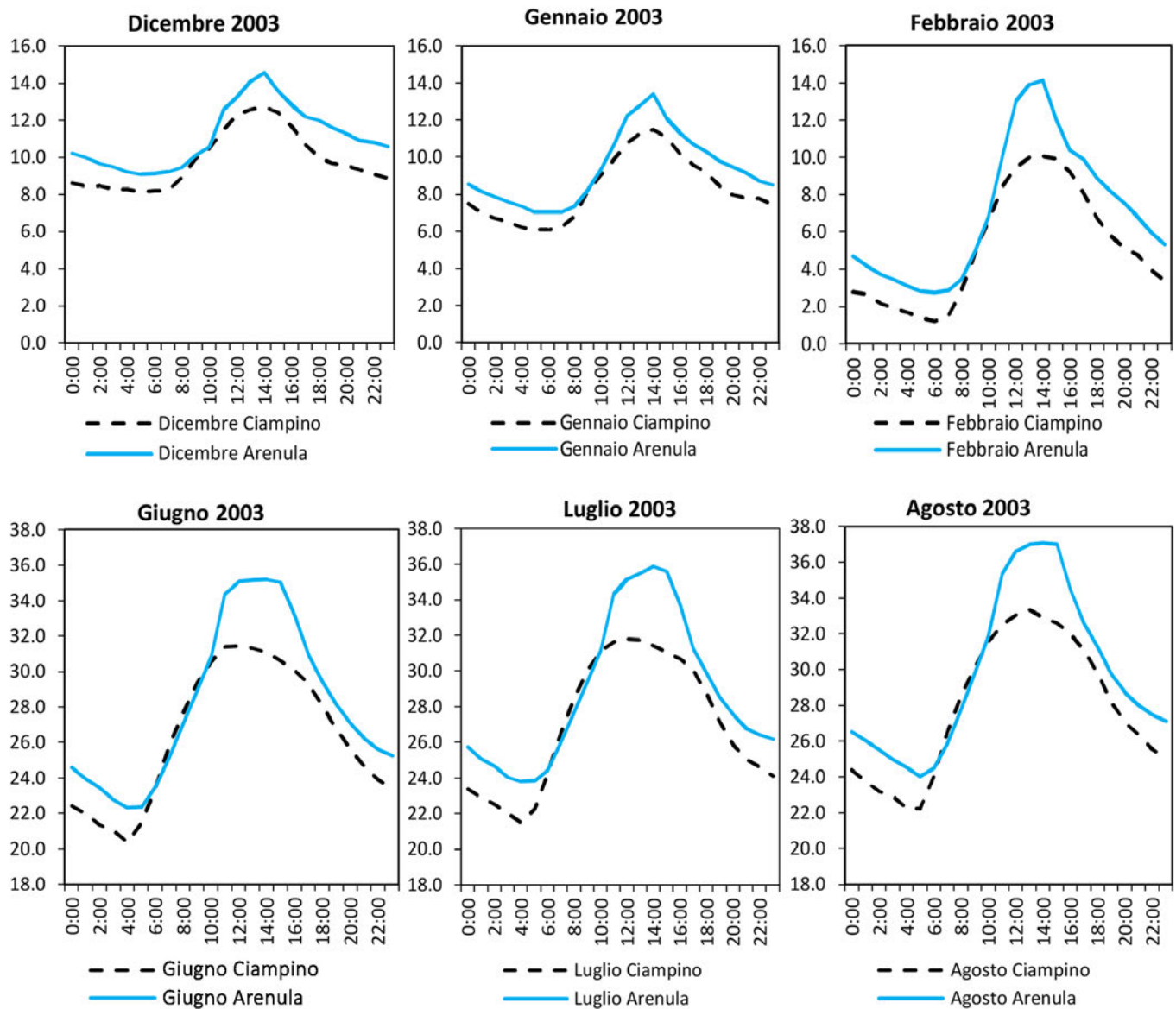
## ISOLA DI CALORE INVERNALE

L'isola di calore invernale è presente a Roma e registrata da entrambe le stazioni meteorologiche. Analizzando l'andamento delle temperature, si nota un'intensità minima durante la mattina, tra le 8:00 e le 9:00. In questo momento della giornata, infatti, la città ha terminato il suo processo di raffreddamento notturno e le temperature tornano a salire (le temperature minime si registrano in entrambi i siti urbani ed in quello rurale alle 5:00). Dato che il processo di riscaldamento è più veloce nell'ambiente rurale non ostruito rispetto ad un'area urbana, soprattutto in inverno quando il sole è basso, le differenze di temperature tra città e campagna tendono a diminuire durante le prime ore di soleggiamento. Tale fenomeno è particolarmente evidente nelle osservazioni di Via Arenula, che presenta in questo lasso di tempo temperature praticamente coincidenti con quelle dell'aeroporto. Con l'aumentare della radiazione solare incidente, le temperature tornano a crescere in maniera significativa anche in città, ma con un ritmo diverso a quota stradale rispetto alla quota dei tetti.

Alla stazione di Via Arenula, infatti, nell'arco temporale tra le 12:00 e le 14:00 locali, si raggiunge il massimo della differenza rispetto alle temperature dell'aeroporto. L'intensità media massima di isola di calore registrata nell'inverno 2003 è pari a 4.1 °C nel mese di febbraio, alle ore 14:00. Tale incremento rilevante delle temperature non è invece evidente nella stazione di Via Boncompagni, così come nelle stazioni di Barcellona posizionate al di sopra del livello dei tetti. Il fenomeno è pertanto da imputarsi al contributo del trapping radiativo nelle ore di massimo irraggiamento, alla vicinanza di fonti di calore antropogenico nonché a fenomeni di ombra di vento e vicinanza alle superfici calde di strada e pareti che nel complesso contribuiscono all'innalzamento delle temperature nella canopia urbana.

Va però rilevato che alla stazione di Via Boncompagni si registra la massima intensità di isola di calore nello stesso mese di febbraio (2013 in questo caso), pari a 2.4 °C rispettivamente alle ore 12:00, 15:00 e 16:00 locali. In entrambi gli anni di riferimento, febbraio è risultato il mese più freddo, con temperature minime significativamente più basse degli altri mesi invernali. L'effetto di mitigazione sulle temperature minime generato dal fenomeno dell'isola di calore fa sì che, in questo mese, le differenze di temperatura siano particolarmente evidenti.

Durante la notte l'isola di calore è rilevata in entrambi i siti di misurazione e si attesta su valori massimi oscillanti tra i 2.4 °C e 1.5 °C a Via Arenula e 2.2 e 1.4 °C a Via Boncompagni. I  $\Delta T$  massimi notturni in entrambi i casi si registrano tra le 19:00 e le 20:00 locali.



**Figura 84** Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto di Ciampino (linea nera tratteggiata) e alla stazione di Via Arenula (linea azzurra) nel 2003

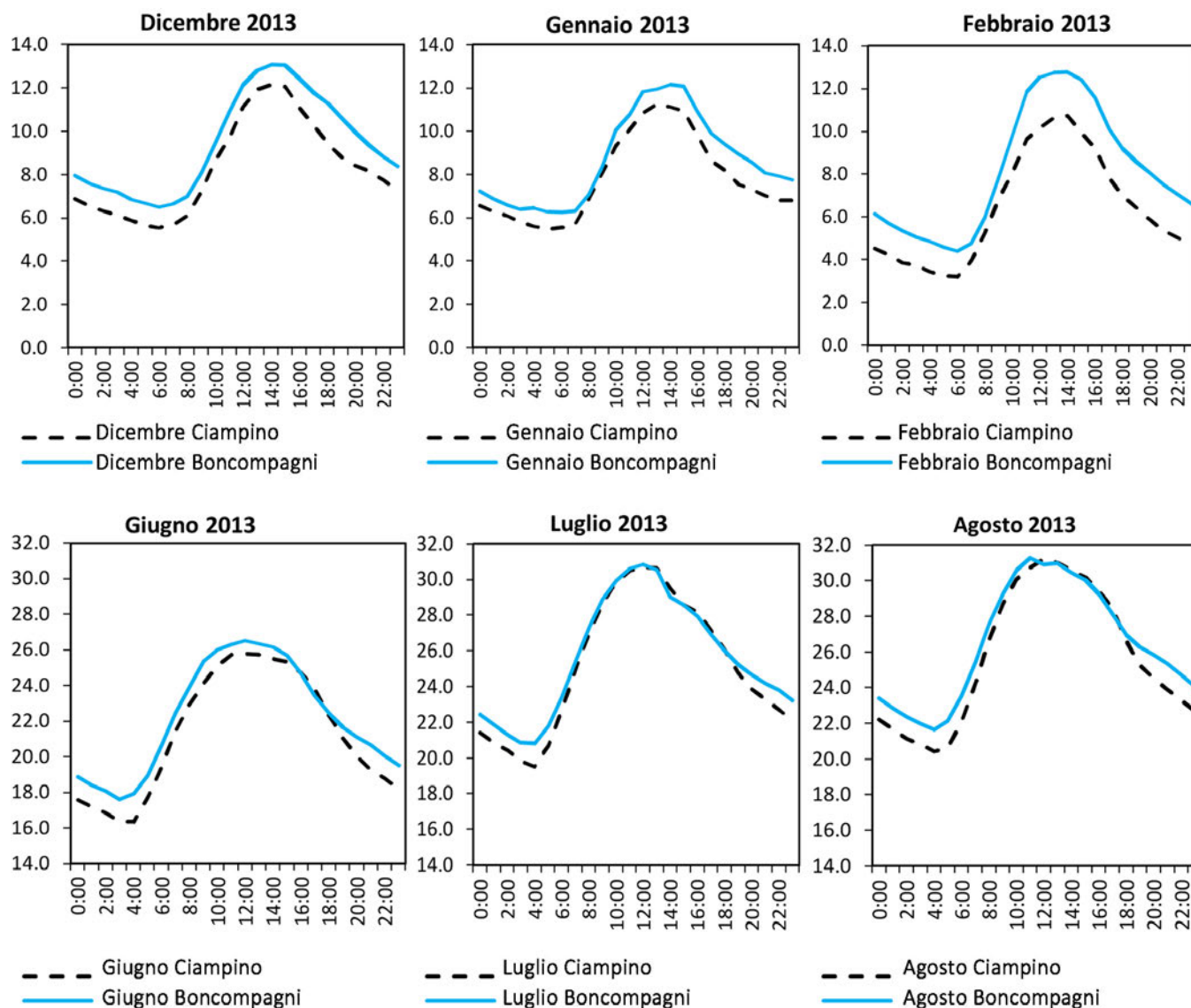
Arenula 2003						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
UHI media	1.2	1.1	1.8	1.8	1.8	1.9
UHI massima	2.0	1.9	4.1	4.4	4.5	4.4
orario max (UTC)	14:00	14:00	18:00	15:00	14:00-15:00	15:00

**Tabella 8** Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Arenula (quota stradale) nel 2003

Boncompagni 2013						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
UHI media	1.1	0.8	1.8	0.9	0.5	0.8
UHI massima	1.9	1.4	2.4	1.6	1.3	1.5
orario max (UTC)	18:00	19:00	15:00-16:00	4:00	4:00	21:00-5:00

**Tabella 9** Isola di calore media mensile e media massima alla stazione di Via Boncompagni (in copertura) nel 2013





**Figura 85** Temperature orarie medie mensili misurate all'aeroporto di Ciampino (linea nera tratteggiata) e alla stazione di Via Boncompagni (linea azzurra) nel 2013

### ISOLA DI CALORE ESTIVA

In estate si registra un'intensità massima di isola di calore alquanto differente nelle due stazioni di riferimento. Il differente comportamento rilevato durante la stagione estiva si osserva in estate in maniera accentuata. L'intensità massima di isola di calore estiva si registra infatti in Via Arenula, durante le ore centrali della giornata, tra le 16:00 e le 17:00 locali, e raggiunge 4.5 °C a luglio e 4.4°C sia a giugno che ad agosto.

Nella stessa fascia oraria, nella stazione di Via Boncompagni posta in copertura, la differenza di temperatura rispetto all'aeroporto è praticamente nulla. L'intensità massima di isola di calore estiva in questa stazione si rileva durante la notte, ed è piuttosto moderata, pari a 1.5 °C durante tutti i mesi estivi.

Il differente comportamento delle due stazioni si può spiegare con le stesse considerazioni fatte per il caso invernale riguardo alle conseguenze del differente posizionamento delle stazioni meteorologiche. Inoltre la presenza del parco di Villa Borghese a circa 500m dalla stazione di Boncompagni può contribuire ad un ulteriore abbassamento delle temperature al livello delle coperture.

Come nel caso di Barcellona, in estate l'isola di calore viene rilevata alla quota dei tetti solo



durante le ore notturne, ma nel caso romano è presente con la stessa intensità durante tutti i mesi estivi.

### 3.3. Campagna di rilevazione a quota stradale

Una seconda parte dello studio sperimentale analizza l'andamento della temperatura nel canyon urbano, utilizzando i dati di una campagna di misurazione della temperatura dell'aria alla quota stradale a Barcellona.

La campagna è stata pianificata con l'obiettivo di isolare l'effetto della geometria del canyon e del suo orientamento sull'andamento della temperatura a livello pedonale.

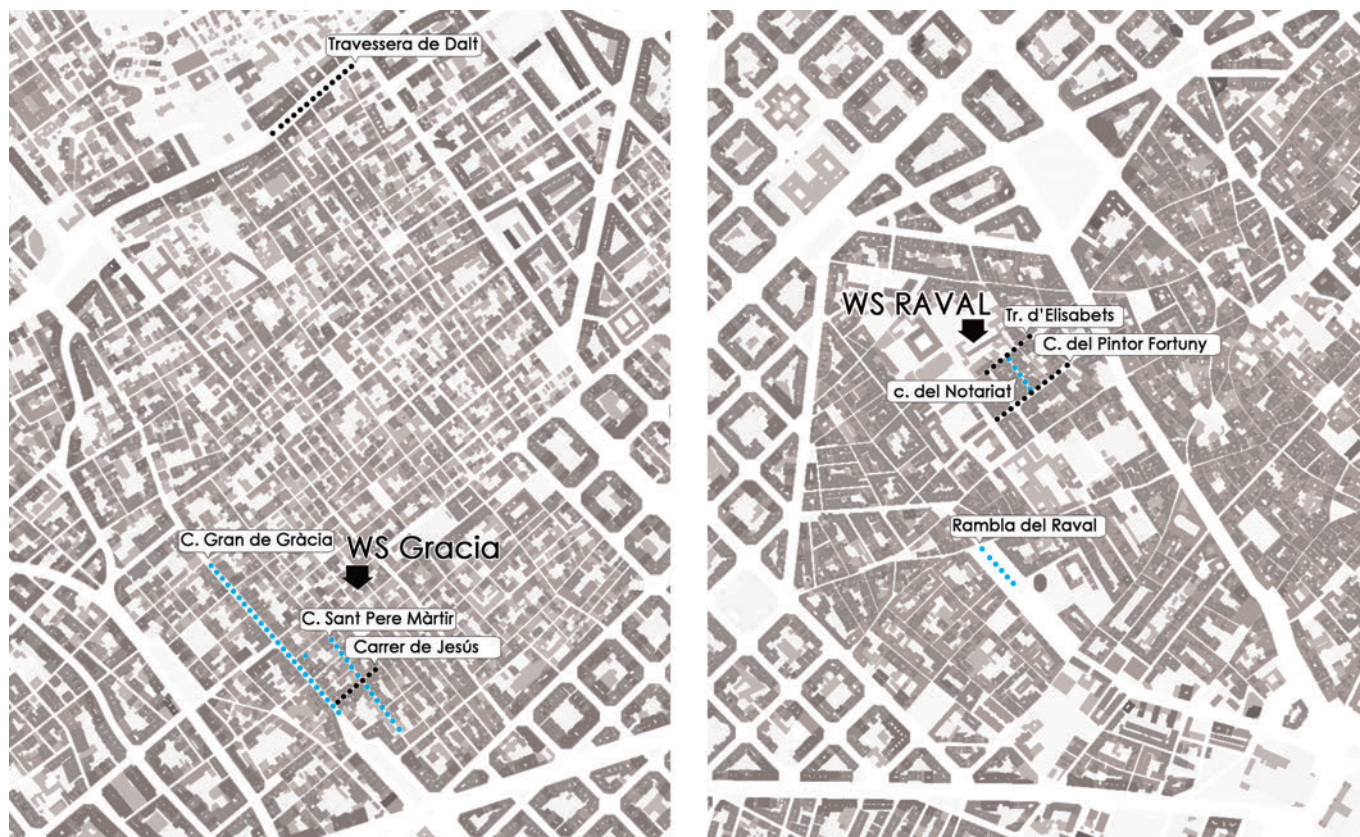
Inoltre consente di valutare l'entità della differenza media di temperatura tra la quota stradale e quella dei tetti, come rilevato dal comportamento di Via Arenula rispetto alle altre stazioni precedentemente analizzate.

#### 3.3.1. Metodo delle rilevazioni

In ciascuno dei due quartieri di Barcellona precedentemente analizzati, ovvero Gracia e Raval, sono stati individuati 4 siti in cui effettuare le rilevazioni, tali che presentassero un rapporto di verticalità sufficientemente differente e, per ciascuno dei due tipi, un orientamento differente (NE-SO e NO-SE). I siti prescelti presentano materiali di rivestimento paragonabili per caratteristiche termiche e radiative, tali da non influire sull'analisi comparativa delle temperature. La campagna è stata effettuata nei giorni 4, 10 e 17 Luglio 2014, in condizioni di cielo sereno o parzialmente nuvoloso.

Le misurazioni sono state programmate ogni 2 ore e la rilevazione è stata mediata su due punti di ciascuna strada analizzata. Le rilevazioni sono state condotte in maniera simultanea in entrambi i quartieri, a partire dalle 7:00 del mattino e terminando all'1:00 della notte (orario CEST). Per il rilevamento è stato utilizzato un termo-anemometro portatile (resolution 0.1°C,

**Figura 86** Canyon analizzati a Gracia e Raval





## Gracia

Carrer de Jesus

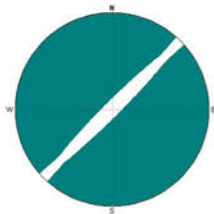


Height: 19m

Width: 4.2 m

H/W : 4.5

Sky view factor: 0.08



Carrer Sant Pere Màrtir

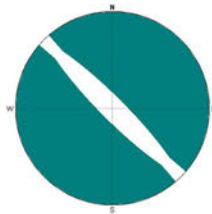


Height: 16m

Width: 5.4m

H/W : 3.0

Sky view factor: 0.12



Carrer Gran de Gràcia

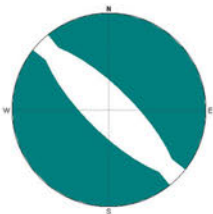


Height: 25m

Width: 17m

H/W : 1.5

Sky view factor: 0.22



Travessera de Dalt

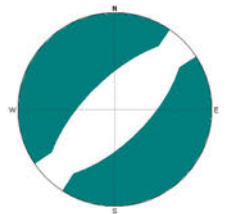


Height: 31m

Width: 30m

H/W : 1

Sky view factor: 0.31



## Raval

Carrer d'Elisabets

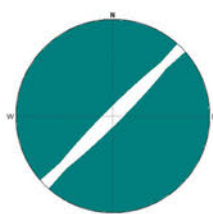


Height: 19.8m

Width: 4.5m

H/W : 4.4

Sky view factor: 0.08



Carrer del Notariat

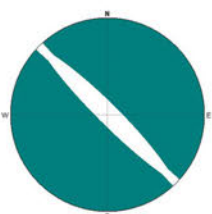


Height: 19.8m

Width: 5.9m

H/W : 3.4

Sky view factor: 0.12



Carrer del Pintor Fortuny

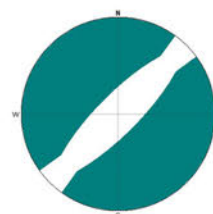


Height: 19.8m

Width: 11.9m

H/W : 1.7

Sky view factor: 0.21



Rambla del Raval

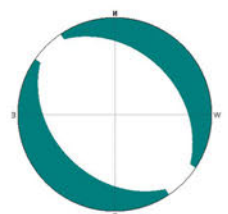


Height: 19.8m

Width: 58m

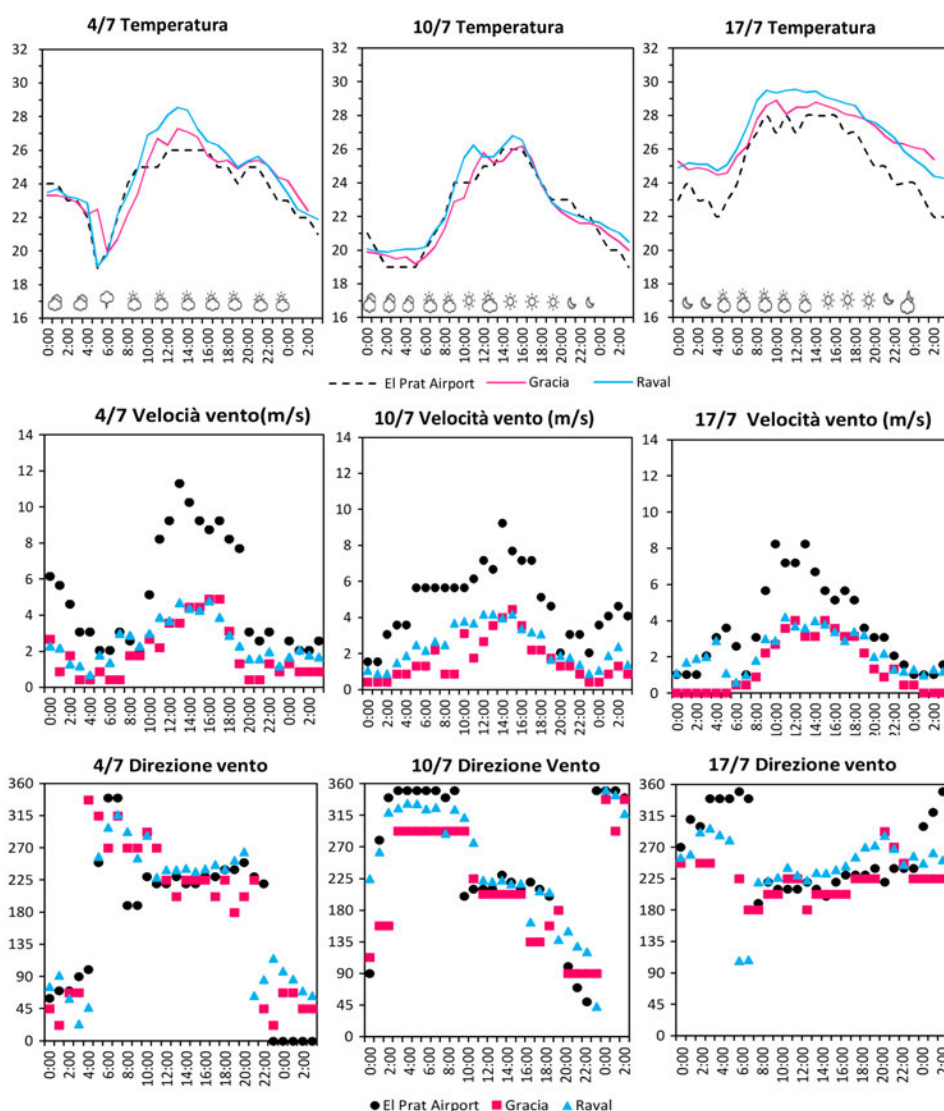
H/W : 0.3

Sky view factor: 0.63



**Figura 87** Nella pagina accanto: Caratteristiche dei canyon della campagna di misurazione. Lo Sky View Factor è stato calcolato con il software Heliodon2.6 (Beckers & Masset, 2006) sulla base di modelli semplificati dei canyon urbani

**Figura 88** Temperatura, velocità e direzione del vento rilevate nelle stazioni meteorologiche fisse durante i giorni di misurazione

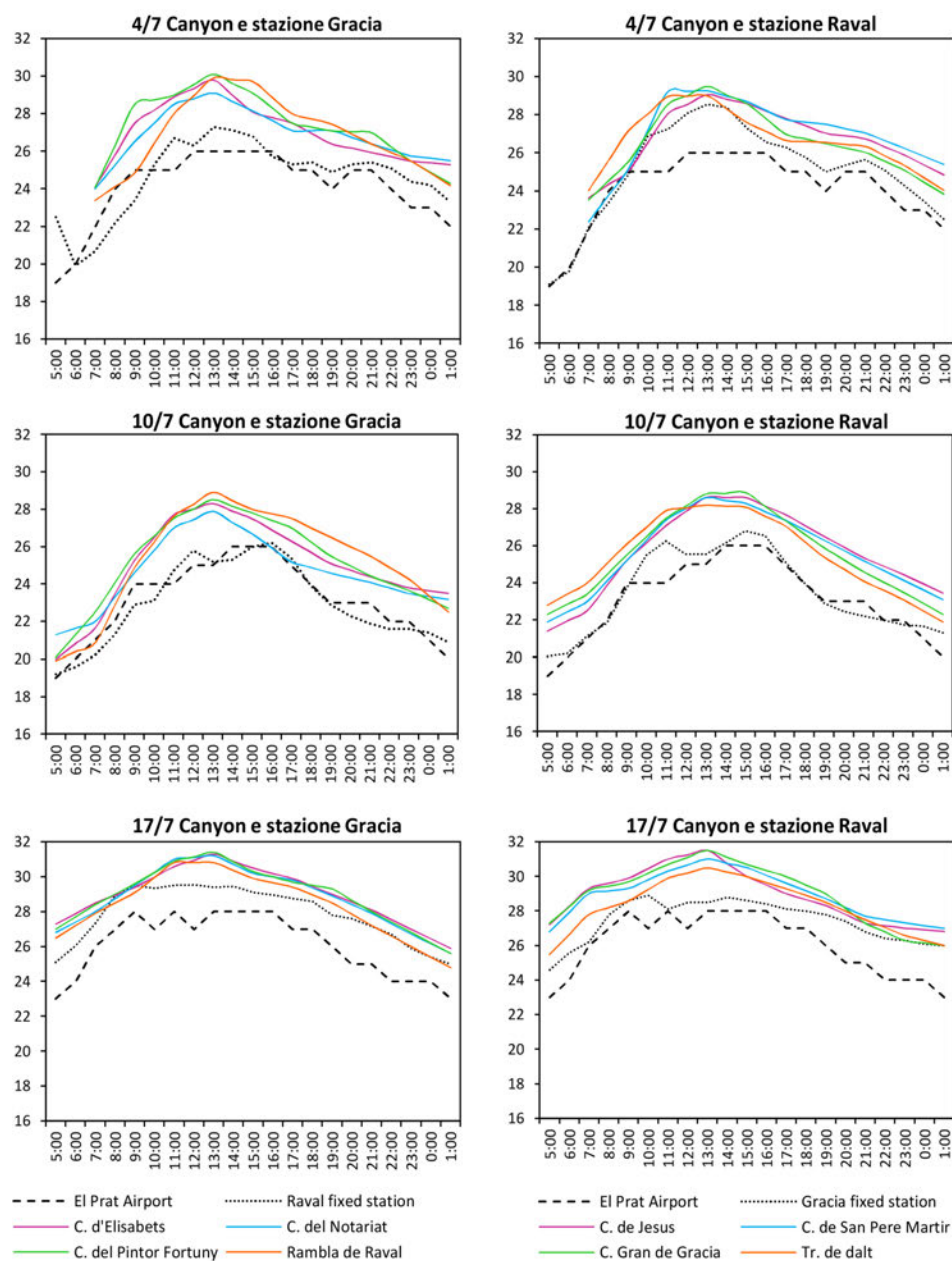


accuracy  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , range  $-10$ — $50^{\circ}\text{C}$ ), collocato a 1,5m rispetto al livello stradale

I casi di studio individuati sono illustrati nelle figure 86 e 87.

I grafici in figura 88 riportano la temperatura dell'aria, la velocità e la direzione del vento misurata all'aeroporto e alle due stazioni meteorologiche precedentemente analizzate (orario UTC). Ora per ora vengono anche riportate le condizioni del cielo durante le misurazioni. Le misurazioni sono state effettuate in condizioni di cielo sereno o poco nuvoloso. Va rilevata la presenza di un evento temporalesco il 4 luglio alle ore 6, poco prima dell'inizio delle rilevazioni.

Analizzando i grafici di velocità e direzione del vento, appare evidente la mitigazione della velocità in area urbana rispetto all'aeroporto ma, seppur attenuato in ambito urbano, l'effetto della brezza marina produce una mitigazione delle temperature nelle ore più calde della giornata, tra le 12 e le 18 ora locale (LST), in tutte le stazioni. In tale intervallo temporale le temperature rilevate all'aeroporto e alla quota dei tetti nelle stazioni urbane rimangono infatti pressoché costanti. La direzione del vento misurata all'aeroporto coincide sostanzialmente con quella misurata nelle stazioni urbane. Il 17 luglio è il giorno più caldo; le temperature massime registrate raggiungono  $28^{\circ}\text{C}$  all'aeroporto,  $28.9^{\circ}\text{C}$  a Gracia e  $29.5^{\circ}$  a Raval.



**Figura 89** Andamento della temperatura dell'aria nei canyon analizzati. Le curve delle temperature derivano dall'interpolazione delle misurazioni puntuali ogni due ore. La linea nera tratteggiata rappresenta la temperatura all'aeroporto. La linea nera puntinata la misurazione nella stazione meteorologica fissa presente in ciascuno dei due quartieri.

CANYON	Altezza (H)	Larghezza (W)	H/W	Orientamento
<b>Gracia</b>				
C. de Jesus	19	4.2	4.5	NE-SO
C. de S. Pere martir	16	5.4	3.0	NO-SE
C. Gran de Gracia	25	17	1.5	NO-SE
Tr. de Dalt	31	30	1.0	NE-SO
<b>Raval</b>				
C. d'Elisabets	19.8	4.5	4.4	NE-SO
C. del Notariat	19.8	5.9	3.4	NO-SE
C. del pintor Fortuny	19.8	11.9	1.7	NE-SO
Rambla del Raval	19.8	58	0.3	NO-SE

**Tabella 10** Rapporto di verticalità dei canyon analizzati durante la campagna di misurazione



### 3.3.2. Risultati e discussione

La massima intensità di isola di calore rilevata alla quota stradale si registra nel giorno più caldo dei tre analizzati, il 17 luglio, alle 5:00 (7:00 LST), raggiungendo un massimo di 4,3 °C sia nel Raval (C. d'Elisabets) che a Gracia (Gran de Gracia e C. de Jesus). Durante tutti e i tre giorni di rilevazione, le differenze massime di temperatura rispetto all'aeroporto si registrano principalmente durante una fascia oraria diurna (tra le 11:00 e le 13:00), all'1:00 e alle 5:00. (ora UTC).

Durante la fascia diurna, l'intensità di isola di calore varia tra i 3°C e 4 °C, senza sostanziali variazioni tra canyon con diverso rapporto di verticalità o orientamento.

In tale intervallo di tempo si verificano due effetti combinati che contribuiscono all'innalzamento delle temperature: la massima accessibilità solare dei canyon (il sole in questa fascia oraria ha un'altezza tra i 65° e i 70°) e la ridotta velocità del vento a quota stradale.

Analizzando i grafici di direzione e velocità del vento all'aeroporto, è possibile infatti rilevare chiaramente l'insorgere della brezza, che coincide con il cambio di direzione del vento a partire dalle 10:00 (12:00 LST) ed un aumento progressivo della velocità, fino ad un massimo tra le 13:00 e le 14:00. L'effetto benefico della brezza risulta già attenuato per intensità nelle stazioni urbane alla quota dei tetti. Alla quota stradale tale effetto è invece nullo, in quanto gli alti valori del rapporto di verticalità dei canyon analizzati determinano uno schema di flusso del tipo "skimming flow" (Oke, 1988); in canyon di tali proporzioni si formano strutture a vortice stabili mentre l'interazione con lo strato di atmosfera al di sopra dei tetti è molto limitata.

In effetti alla quota stradale i massimi della Temperatura si osservano circa due ore dopo rispetto a quanto osservato sui tetti, a riprova del fatto che nei canyon analizzati l'aria marina non arriva, o ne arriva molto poca e non ha effetto sulle temperature. Nelle stesse ore la radiazione solare è alla sua massima potenza e l'altezza solare è tale da raggiungere anche la quota stradale. Ciò determina un incremento significativo delle temperature nelle aree urbane rispetto all'aeroporto.

Le misurazioni effettuate all'1:00 e alle 5:00 rivelano una differenza di temperatura rispetto all'aeroporto dello stesso ordine di grandezza, ma principalmente nei canyon con alto rapporto di verticalità, indipendentemente dall'orientamento degli stessi. In tal caso, essendo assente la radiazione solare e bassa la velocità del vento anche all'aeroporto, tale differenza è da imputarsi principalmente all'effetto di isola di calore e alla geometria dei canyon.

Il rallentamento del raffreddamento dei canyon con alto rapporto di verticalità è comunque evidente già dalle 19:00 circa, per effetto della ridotta visibilità del cielo da parte delle superfici surriscaldate e del conseguente trapping della radiazione a onda lunga emessa dalle superfici. Tale andamento si riscontra in maniera del tutto analoga nei due orientamenti prescelti e porta a concludere che l'orientamento del canyon è una variabile meno influente rispetto alla sua geometria per quanto riguarda l'andamento delle temperature dell'aria e dell'isola di calore.

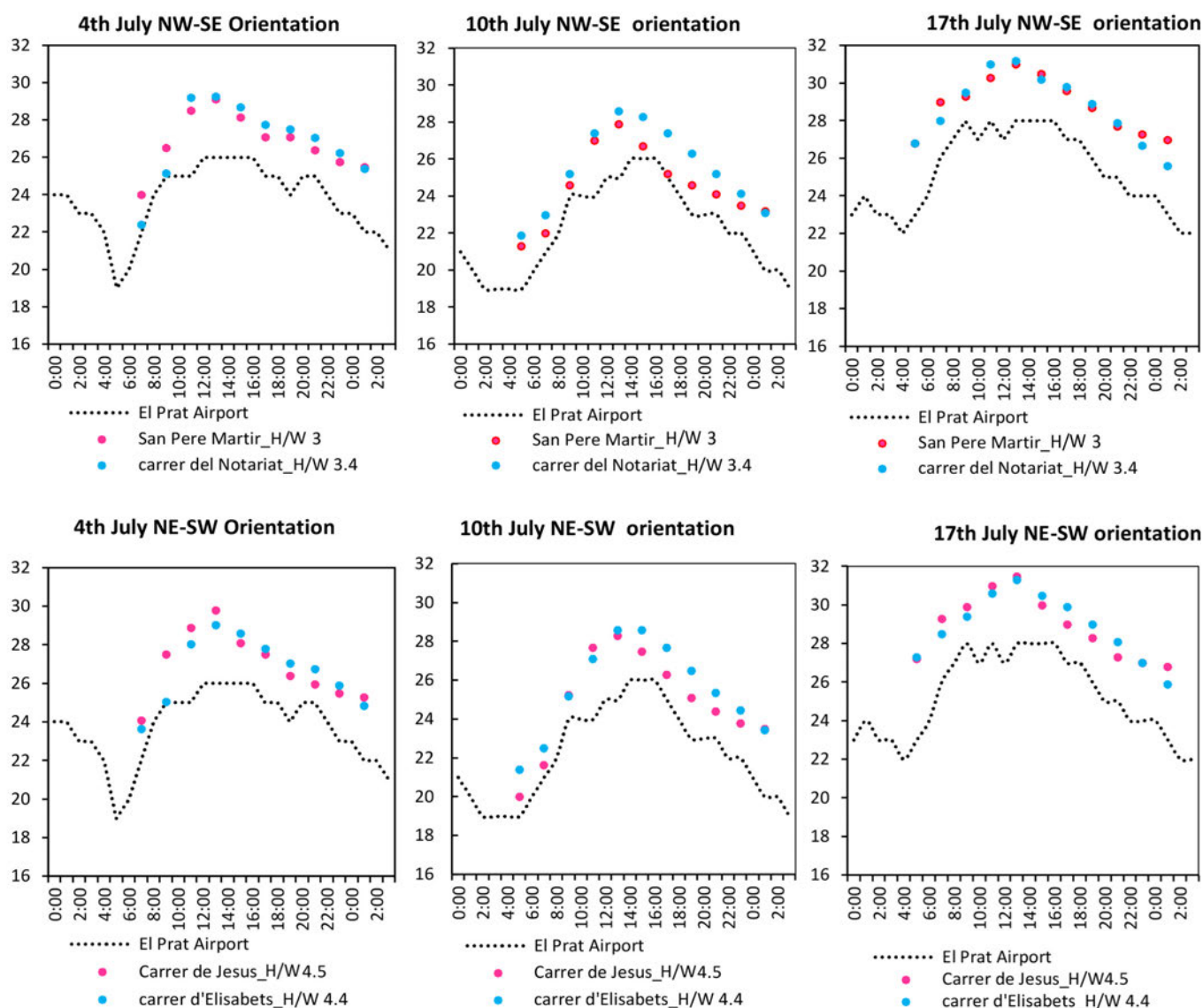
#### » ΔT TRA LIVELLO STRADA E LIVELLO DEI TETTI

Le misurazioni confermano una sostanziale differenza tra le temperature dell'aria misurate alla quota stradale e quella all'altezza dei tetti, soprattutto durante il giorno; le temperature alla quota stradale risultano consistentemente più elevate rispetto alle rilevazioni al di sopra dei tetti, per tutti i casi di studio, sia durante il giorno che durante la notte. Durante il giorno, ed in particolare in corrispondenza delle ore in cui il vento proviene dal mare, l'incremento medio della temperatura alla quota stradale è mediamente di 2°C rispetto alle rilevazioni in copertura.

I grafici in figura 90 mostrano il confronto tra l'andamento delle temperature nei canyon di alto rapporto di verticalità e uguale orientamento ma siti nei due diversi quartieri. In particolare si compara il comportamento di c. de Sant Pere Martir con c. del Notariat per l'orientamento NO-SE e c. de Jesus e c. d'Elisabets per l'orientamento NE-SO.

Come già evidenziato, il differente orientamento non costituisce una discriminante significativa per quanto riguarda l'andamento della temperatura dell'aria. Inoltre, in tutti i giorni di misu-





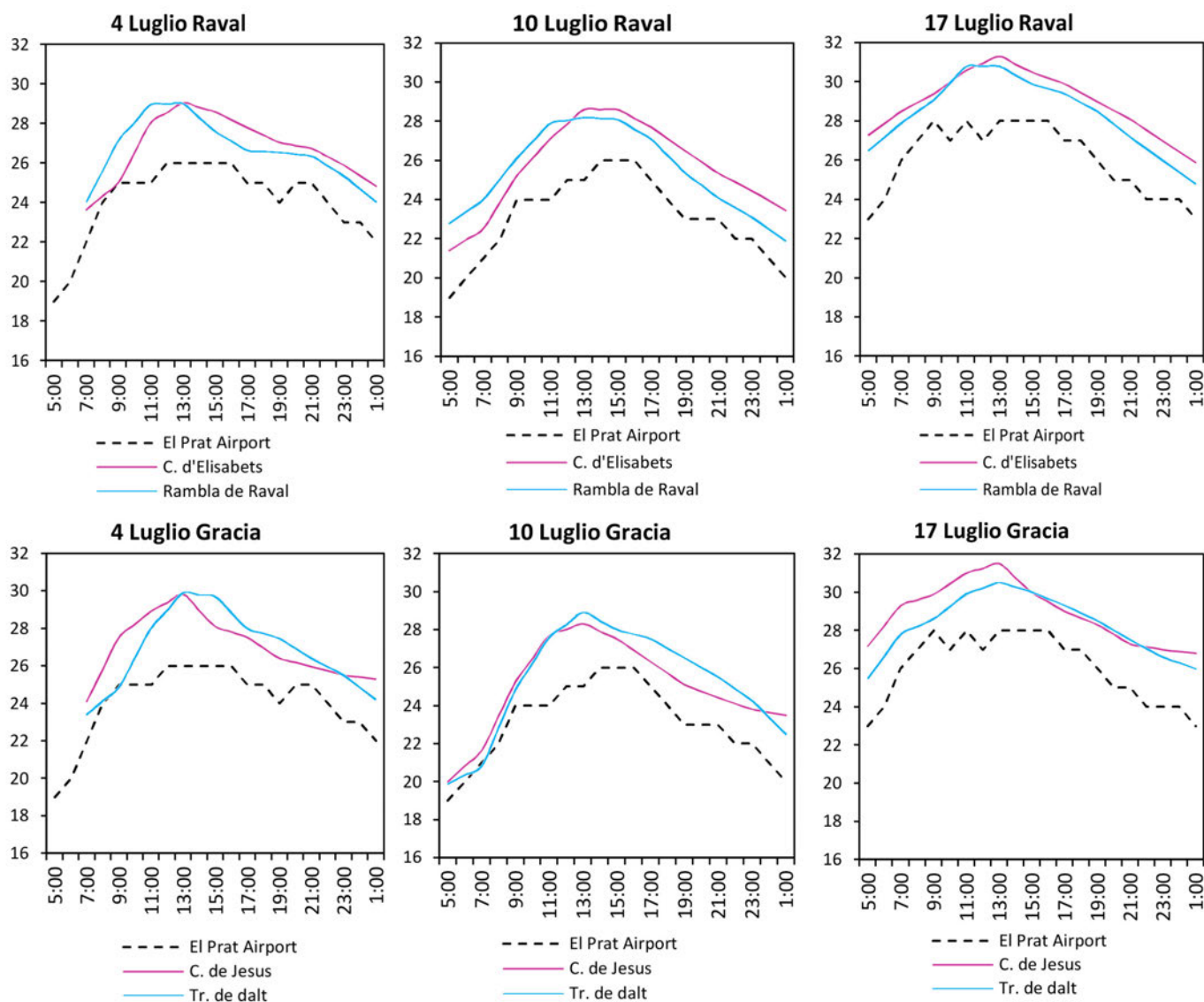
**Figura 90** Confronto tra canyon con alto rapporto di verticalità e stesso orientamento ma situati in quartieri differenti (San Pere Martir e Carrer de Jesus a Gracia e Carrer del Notariat e Carrer d'Elisabets a Raval)

razione e in entrambi gli orientamenti, le temperature dell'aria nei canyon del Raval sono leggermente superiori a quelle di Gracia. Si ripropone, pertanto, la stessa tendenza analizzata nell'andamento delle medie mensili annuali nella stagione estiva, in cui le temperature di Raval risultano sempre leggermente superiori a quelle di Gracia. Tale risultato pertanto avvalorare l'ipotesi per cui a Raval, tanto a livello dei tetti che alla quota stradale, le temperature sono sempre maggiori rispetto a Gracia probabilmente per le caratteristiche di densità e morfologia caratterizzanti l'intero quartiere.

#### ISOLA DI CALORE E GEOMETRIA DEL CANYON

La campagna di misurazione conferma la rilevanza della geometria del canyon nella formazione dell'isola di calore. Tale effetto è chiaro quando si compara l'andamento delle temperature in canyon dello stesso quartiere ma con differente rapporto di verticalità (figura 91).

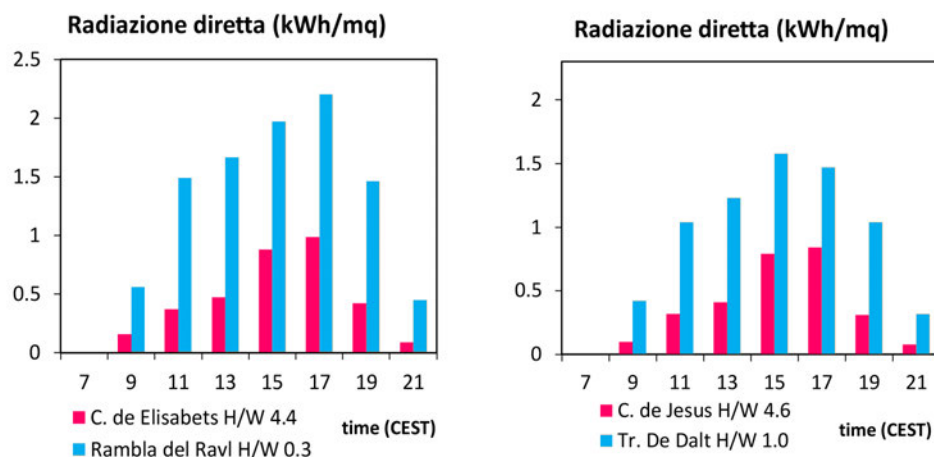
Nel caso del Raval, si compara l'andamento delle temperature in un canyon con alto rapporto di verticalità (Elisabets, H/W 4.4) rispetto ad un canyon estremamente ampio, a tutti gli effetti una piazza (Rambla del Raval, H/W 0.3). I due canyon presentano anche orientamento differente (NE-SO C. d'Elisabets e NO-SE la Rambla), ma la vera discriminante rispetto alla quantità di radiazione solare entrante è la geometria, come apprezzabile dal grafico in figura 92 in cui si compara la radiazione solare diretta accumulata dalle superfici del canyon (pareti e strada), calcolata su un modello semplificato tramite il software Heliodon (Beckers & Masset, 2006).



**Figura 91** Andamento delle temperature in canyon dal differente rapporto di verticalità a Raval (sopra) e Gracia (sotto)

In virtù della geometria, la Rambla del Raval riceve una quantità di radiazione solare diretta di gran lunga superiore a C. d'Elisabets che, però, non è direttamente proporzionale alle temperature dell'aria *misurata* nel canyon stesso. Nei grafici in figura 91 si nota che la Rambla del Raval risulta chiaramente più calda di Elisabets tra le 5:00 e le 13:00 (ora UTC), periodo in cui la temperatura dell'aria cresce piuttosto velocemente, in accordo con l'aumentare della radiazione solare incidente. L'incremento delle temperature in C. d'Elisabets è più smorzato, dato l'accesso solare ridotto determinato dalla sua geometria. A partire dalle 13:00, però, si assiste ad una inversione del comportamento tra i due canyon, con temperature maggiori in quello più profondo rispetto a quello poco profondo. Da questo momento in poi le temperature rimangono maggiori in C. d'Elisabets rispetto a Rambla del Raval. Pertanto, seppur il canyon ampio riceva molta più radiazione durante il giorno, esso può anche raffreddarsi in tempi relativamente veloci, vedendo scendere la propria temperatura al decrescere della radiazione. Ciò non avviene nei canyon stretti, in cui il calore irradiato dalle superfici rimane intrappolato nel canyon, contribuendo a mantenere temperature elevate anche durante il tardo pomeriggio e la notte.

Il caso di Gracia è, invece, leggermente differente. In tal caso si propone la comparazione tra C. de Jesus (H/W 4.6) e Tr. De Dalt (H/W 1.0), canyon con lo stesso orientamento NE-SW. Anche in questo caso, la differenza di radiazione ricevuta dai due canyon è molto rilevante (figura 92), ma non si traduce in un ugual andamento delle temperature dell'aria.



**Figura 92** Radiazione solare diretta accumulata dalle superfici (strada e pareti) di canyon con diverso rapporto di verticalità. A sinistra C. de Elisabets e Rambla del Raval, a Raval e a destra C. de Jesus e Tr. de dalt a Gracia. Elaborazione dati simulati con il modello Heliodon2 (Beckers & Masset, 2006)

Osservando le temperature nelle due strade di Gracia, si nota che nelle prime ore del mattino e fino alle 13:00, il canyon più stretto risulta più caldo. A partire dalle 15 si assiste ad una inversione di tendenza, per cui Travessera de Dalt presenta temperature dell'aria maggiori di C. de Jesus, fino alle 23:00. All'1:00, invece, C. de Jesus torna ad essere più calda di Tr. de Dalt. Oltre a tale inversione notturna, è possibile apprezzare un differente comportamento del canyon stretto rispetto al canyon più ampio a partire dalle 19:00. Nel tardo pomeriggio infatti C. de Jesus presenta un evidente rallentamento del raffreddamento se comparato a Tr. de Dalt, che mantiene un gradiente di abbassamento della temperatura costante a partire dalle 15:00. La diversa velocità di raffreddamento porta, ad avere  $T$  maggiori nel canyon stretto sia all'1:00 di notte che nelle primissime ore del mattino. Tale comportamento è indubbiamente da imputarsi alla geometria del canyon e all'effetto del trapping della radiazione infrarossa emessa dalle superfici surriscaldate, particolarmente rilevante in canyon con alto rapporto di verticalità.

I risultati confermano pertanto la rilevanza della geometria del canyon sull'andamento della temperatura dell'aria alla quota stradale, soprattutto durante la notte. All'1:00 e alle 5:00 (UTC) si registrano le massime differenze di temperatura tra i canyon siti nello stesso quartiere ma con differente rapporto di verticalità; tali differenze sono dell'ordine di 0.8-1.7 °C a seconda del giorno e dell'orario considerato.

### 3.4. Sintesi dei risultati e conclusioni

Lo studio sperimentale ha confermato la presenza dell'isola di calore nelle due città Mediterranee, con intensità significative sia in inverno che in estate e con comportamenti differenti durante l'arco dell'anno e della giornata a seconda che si analizzi il fenomeno in prossimità della quota stradale o al di sopra del livello dei tetti.

Durante l'inverno l'incremento delle temperature nel substrato di rugosità urbano è evidente. L'intensità media massima di isola di calore a Barcellona si ha a dicembre, con valori pari a 2.8°C a Raval e 2.6°C a Gracia. Analogamente a Roma, a febbraio, la stazione di via Boncompagni registra un'intensità media massima di 2.4 °C. In entrambe le città i massimi si verificano qualche ora dopo il tramonto e durante la notte. Sia a Roma che a Barcellona l'intensità massima di isola di calore invernale si verifica nel mese più freddo dell'anno analizzato, confermando l'incidenza del calore antropogenico sul fenomeno nella stagione invernale, come riportato da altri studi (Pigeon et al. 2007; Sailor, 2011).

In estate l'isola di calore misurata nel substrato di rugosità è più debole. A Barcellona raggiunge un'intensità media massima a giugno, pari ai 1.7°C a Raval e 1.3°C a Gracia. A Roma, alla stazione di Via Boncompagni, l'intensità massima misurata è pari a 1.6°C sempre a giugno. A Barcellona le temperature risultano sempre leggermente più basse nel quartiere di Gracia

rispetto a Raval, probabilmente per motivi di densità dell'edificato nell'intorno urbano della stazione. Entrambe le città risentono dell'effetto benefico della brezza, ma a Barcellona tale fenomeno è molto più evidente e comporta un appiattimento delle temperature durante le ore più calde della giornata e, pertanto, un'escursione termica giornaliera particolarmente bassa. Tale fenomeno contribuisce a smorzare anche l'effetto dell'isola di calore, che nei mesi di luglio e agosto è quasi nullo ed esclusivamente notturno.

Le misurazioni nei canyon rivelano invece un andamento differente delle temperature. A Roma, a Via Arenula, si registra un'isola di calore significativa sia in inverno che in estate. In inverno l'UHI media massima si ha a febbraio, con 4.1 °C, tra le 14:00 e le 18:00. Anche durante tutti i mesi estivi l'intensità media massima si attesta intorno ai 4.5°C e si verifica di giorno, intorno alle 17:00 ora locale. La campagna di misurazione svoltasi in diversi canyon dei quartieri di Gracia e Raval conferma la presenza di un'isola di calore estiva pari ad un massimo di 4.3°C anche a Barcellona, se valutata alla quota stradale. In tal caso l'isola di calore massima è stata misurata il 17 luglio sia nel quartiere di Gracia alle 7:00, nel canyon con maggior rapporto di verticalità (C. de Jesus), che nel Raval alle 5:00, sempre nel canyon con rapporto di H/W maggiore (Traversera d'Elisabets).

L'incremento notevole delle temperature alla quota stradale rispetto alla quota dei tetti è da imputarsi principalmente a tre effetti: il trapping radiativo, sia diurno che notturno, la vicinanza a fonti di calore antropogenico e l'assenza dell'effetto benefico della ventilazione e della brezza marina estiva.

A fronte delle analisi condotte, va sottolineato che la raccolta di dati climatici urbani è ancora estremamente difficile. Le stazioni meteorologiche urbane sono molto scarse e spesso collocate in posizioni non idonee per un corretto utilizzo dei dati. Ricordiamo infatti che esistono dei criteri per la corretta collocazione delle stazioni di riferimento per l'analisi del clima urbano (Oke, 2006) il cui mancato rispetto comporta un livello di errore importante.

La difficoltà nel reperimento di dati urbani consistenti e diffusi sull'intera area urbana avvalorata l'utilità dei modelli recentemente sviluppati per simulare il clima urbano e gli sforzi di vari settori disciplinari per la loro implementazione.

- Asociación GvSIG. (2015). GVSIG 2.2 - User guide. Retrieved from [www.gvsig.com](http://www.gvsig.com)
- Beckers, B., & Masset, L. (2006). Heliodon2, software and user's guide. Retrieved from [www.heliodon.net](http://www.heliodon.net)
- Bonacquisti, V., Casale, G. R., Palmieri, S., & Siani, a M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *The Science of the Total Environment*, 364(1-3), 1–13. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.09.097
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., & Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), 269–281. doi:10.1080/19401493.2012.718797
- Cantelli, A., Monti, P., & Leuzzi, G. (2008). A subgrid surface scheme for the analysis of the urban heat island of rome. *Croatian Meteorological Journal*, 43, 354–358.
- Cappuccitti, A. (2006). *Tessuti e centralità nella morfologia urbana di Roma* (I.). Roma: Aracne editrice.
- Carreras, C., Marin, M., Vide, J. M., & Moreno-Garcia, M. C. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor en Barcelona, *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 17, 51–77.
- Colacino, M., & Lavagnini, a. (1982). Evidence of the urban heat island in Rome by climatological analyses. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology Series B*, 31(1-2), 87–97. doi:10.1007/BF02311344
- Fabrizi, R., Bonafoni, S., & Biondi, R. (2010). Satellite and Ground-Based Sensors for the Urban Heat Island Analysis in the City of Rome. *Remote Sensing*, 2(5), 1400–1415. doi:10.3390/rs2051400
- Filpa, A., & Ombuen, S. (2014). La carta della vulnerabilità climatica di Roma 1.0. *URBANISTICATRE*, 5, 47–58.
- Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14, 705–710. doi:10.1002/joc.3370140609
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. London: Methuen.
- Oke, T. R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11, 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6
- Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Instruments and Observing Methods, Report No.*(WMO/TD-No. 1250).
- Pelliccioni, a., Monti, P., Gariazzo, C., & Leuzzi, G. (2012). Some characteristics of the urban boundary layer above Rome, Italy, and applicability of Monin–Obukhov similarity. *Environmental Fluid Mechanics*, 12(5), 405–428. doi:10.1007/s10652-012-9246-3
- Petenko, I., Mastrantonio, G., Viola, A., Argentini, S., Coniglio, L., Monti, P., & Leuzzi, G. (2011). Local Circulation Diurnal Patterns and Their Relationship with Large-Scale Flows in a Coastal Area of the Tyrrhenian Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 139(2), 353–366. doi:10.1007/s10546-010-9577-x
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., & Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27(September), 1969–1981. doi:10.1002/joc.1530
- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, a., Clappier, a., ... Voogt, J. a. (2005). BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), 231–261. doi:10.1007/s00704-004-0117-9
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31(2), 189–199. doi:10.1002/joc.2106
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1







# MODELLAZIONE DELL'ISOLA DI CALORE

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi modelli per la simulazione dell'isola di calore, che rappresentano un valido aiuto per la prefigurazione del fenomeno a scala urbana e locale, consentendo una previsione delle aree maggiormente vulnerabili, la stima delle conseguenze sulla performance energetica dell'edificio e la valutazione dell'efficacia delle possibili strategie di mitigazione.

Tali modelli adottano una rappresentazione semplificata della realtà urbana e sono ancora in corso di sviluppo e di validazione (Grimmond et al., 2010). Tuttavia esistono schemi già ampiamente validati che hanno dimostrato un buon grado di accuratezza nella simulazione dell'isola di calore, quali, ad esempio, il Town Energy Balance (Valéry Masson, 2000).

Di seguito verrà presentato uno studio numerico dell'isola di calore mediante il modello Urban Weather Generator, recentemente sviluppato da Bueno et al. (2013) come implementazione del Town Energy Balance. Il modello consente di simulare i dati meteorologici urbani a partire dai dati di una stazione collocata al di fuori della città, in zona rurale o semi rurale.

Tale strumento è stato scelto perchè risulta particolarmente utile ai fini ingegneristici ed architettonici, data la semplicità e la rapidità nel calcolo e la compatibilità degli output con i più diffusi programmi di modellazione energetica.

Il presente capitolo illustra il funzionamento generale del modello e le variabili coinvolte nel calcolo. Inoltre si presenta uno studio di validazione utilizzando come termine di paragone i dati di temperatura misurati alle stazioni rurali ed urbane di Roma che a Barcellona.

I risultati della validazione hanno permesso di stimare il grado di affidabilità del modello nella simulazione dell'isola di calore. In particolare l'accuratezza del calcolo del programma è stata valutata in relazione all'impiego di tali temperature ai fini di simulazioni energetiche più realistiche rispetto a quelle che utilizzano come input i file meteorologici standard, che normalmente si riferiscono agli aeroporti.

Il capitolo si chiude con alcune raccomandazioni per l'uso dello strumento ed il calcolo dei parametri necessari alla simulazione ed una valutazione dei suoi limiti di utilità ed applicabilità.

## 4.1 Urban Weather Generator

L'Urban Weather Generator (UWG) è stato sviluppato da Bueno et al. (2013) per calcolare l'andamento delle temperature in un canyon urbano sulla base di variabili meteorologiche misurate in una stazione rurale o sub-urbana. L'UWG converte le temperature misurate in una stazione meteorologica rurale in temperature relative ad un canyon urbano, rappresentativo di una porzione di città omogenea per destinazione d'uso e morfologia.

L'UWG è un modello di canopia urbana ("Urban Canopy Model"-UCM) che permette la previsione del fenomeno dell'isola di calore alla scala locale risolvendo il bilancio energetico dei flussi di calore alle superfici del volume d'aria associato al canyon tipo, tenendo in considerazione le relazioni fisiche fondamentali che governano le interazioni energetiche tra edifici e ambiente urbano.

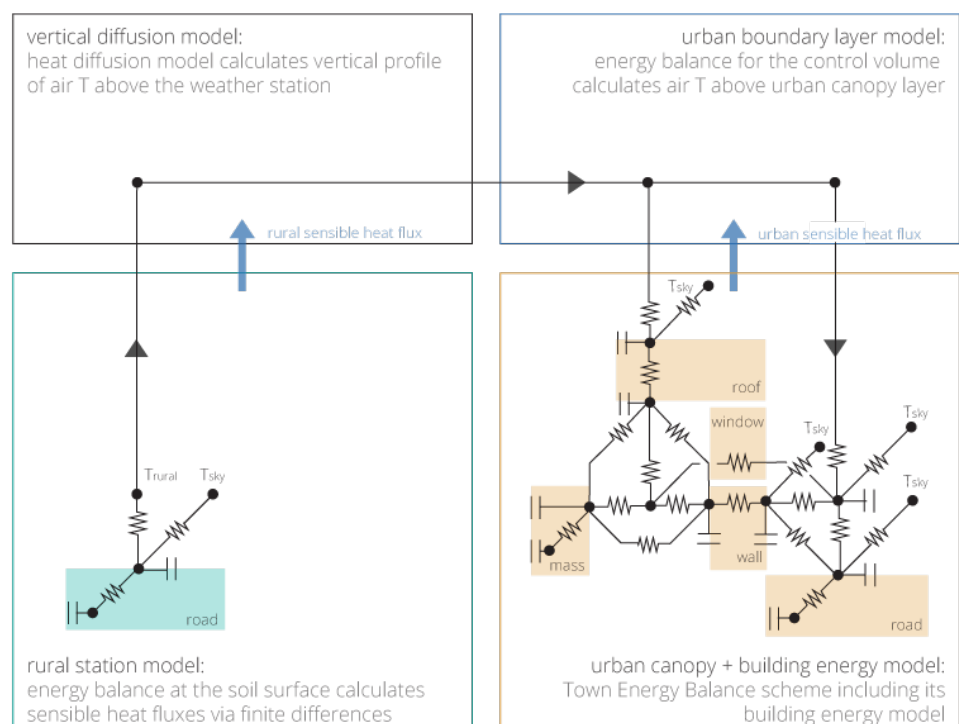
Il modello è fondato sulla parametrizzazione bidimensionale del canyon utilizzato nel Town Energy Balance (Valéry Masson, 2000) ed è composto di quattro moduli: il modello della stazione rurale ("Rural Station Model"-RSM), il modello di diffusione verticale ("Vertical Diffusion Model"-VDM), il modello dello strato limite urbano ("Urban Boundary-Layer model"-UBL) ed il modello del canyon urbano integrato con un modello energetico dell'edificio ("Urban Canopy and Building Energy Model"-UC-BEM).

Il "Rural Station Model" calcola il flusso di calore sensibile rurale in funzione dei parametri descrittivi della stazione meteorologica operativa. Il modello si basa sul bilancio di energia alla superficie del suolo e risolve pertanto l'accumulo di calore nei diversi strati del terreno ed il rilascio di calore sensibile verso l'atmosfera.

Successivamente il "Vertical Diffusion Model" calcola il profilo verticale della temperatura dell'aria sopra la stazione meteorologica ( $\Theta_{\text{rur}}$  - figura 94) mediante la risoluzione dell'equazione di diffusione del calore.

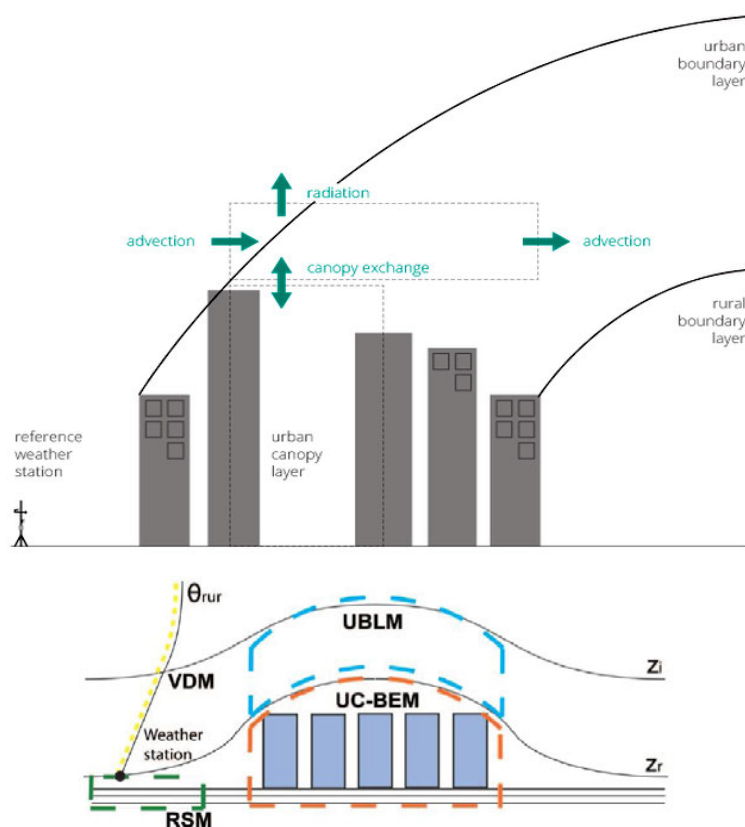
Il modulo "Urban Boundary-Layer" calcola la temperatura dell'aria nello strato limite urbano, mediante i dati ricevuti dal "Vertical Diffusion Model" e dal "Urban Canopy and Building Energy Model", che fornisce il flusso di calore sensibile urbano. Elaborando i dati attraverso l'equazione del Bilancio di Energia nel volume di controllo all'interno dello Strato Limite Urbano ( $Z_r$ - $Z_i$ ), il modulo restituisce il valore della temperatura potenziale dell'aria.

Il Modulo "Urban Canopy and Building Energy Model" calcola quindi la temperatura e l'umidità



**Figura 93** Schema dell'interazione tra i moduli di calcolo di UWG e dei flussi di calore considerati. Fonte: <http://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>





**Figura 94** In alto: Flussi energetici considerati per la determinazione della temperatura media omogenea nella canopia urbana – Fonte: <http://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>. In basso: Rappresentazione dei domini fisici dei 4 moduli di calcolo, Fonte: Bueno, 2013

del canyon mediante il metodo del bilancio termico sulle superfici di un volume di controllo, tenendo conto della capacità termica dell'aria stessa. Il risultato fornito è da considerarsi un valore medio omogeneo per tutto il canyon in esame.

Nella risoluzione del Bilancio Termico, l'UWG tiene conto:

1. dei flussi di calore dalle pareti, dalle finestre e dalla strada
2. dell'interscambio di calore sensibile tra l'aria nel canyon urbano e lo strato di atmosfera superiore
3. dei flussi di calore dovuti all'infiltrazione, al riscaldamento, ai sistemi di climatizzazione e ventilazione meccanica (HVAC) e ad altro calore di origine antropica
4. dello scambio di calore radiante tra l'aria e il cielo

A tal fine il modello calcola la radiazione solare ricevuta dalle pareti e dalla strada considerando un orientamento medio del canyon. Lo scambio radiativo tra pareti, strada e volume d'aria racchiuso nel canyon è computato mediante la linearizzazione della legge di Stefan-Boltzmann, considerando una sola riflessione dei flussi radiativi tra le superfici.

I dati di input per la simulazione vengono inseriti in forma parametrica in un file xml e raccolgono l'insieme delle variabili alla macro-scala, alla scala locale e alla micro-scala necessarie a risolvere i suddetti bilanci energetici.

I parametri da inserire riguardano le caratteristiche della stazione rurale, le caratteristiche dell'area urbana che si intende studiare e le caratteristiche del canyon e dell'edificio tipico dell'area; nello specifico i parametri più rilevanti riguardano le caratteristiche dei materiali presenti (proprietà termiche e radiative), la percentuale di superfici trasparenti e la presenza di sistemi di riscaldamento e raffreddamento per quanto riguarda l'edificio e la morfologia dell'edificato e la presenza di vegetazione nell'area urbana di riferimento.

Come dati meteorologici di input il modello richiede un file meteorologico orario annuale di una stazione rurale in formato epw, formato standard per i dati meteorologici utilizzati per le simulazioni energetiche.

La caratterizzazione delle aree di studio attraverso dati parametrici ed i contenuti tempi di simulazione permettono di eseguire analisi di sensibilità delle variabili in gioco e di comparare facilmente i risultati. Inoltre i risultati della simulazione sono forniti in un formato di dati meteorologici standard (.epw), che permette successive simulazioni energetiche attraverso qualsiasi programma di calcolo (EnergyPlus, Ecotect, Design Builder...). L'insieme di queste caratteristiche rende il programma adeguato per lo sviluppo delle successive fasi del lavoro di tesi<sup>1</sup>.

#### 4.1.1. Accuratezza del modello

Il modello di calcolo UWG è stato testato e validato per le città di Basilea in Svizzera, Tolosa in Francia (Bueno et al., 2013) e Singapore (Bueno, 2014), mostrando un buon livello di accuratezza per tutte e tre le città. Per Basilea si è fatto riferimento ai dati sperimentali dell'estensiva campagna di misurazione nota come BUBBLE (Rotach et al., 2005), per Tolosa alla campagna di misurazione CAPITOUL (Masson et al., 2008) mentre per Singapore sono stati utilizzati dati di rilevazioni effettuate nel 2010 in differenti quartieri della città (Bueno et al., 2014).

Il programma è stato validato comparando le temperature calcolate con quelle misurate nei differenti siti urbani di riferimento.

Nel caso di Basilea il modello sottostima le temperature urbane con un errore medio di 0.9 K, a fronte di un'isola di calore massima misurata di 5,2 K. Per Tolosa l'errore varia tra i 0.7 e 1.1 K, a fronte di un'isola di calore massima misurata di 3.6 K. Anche nel caso di Singapore l'entità dell'errore è dell'ordine di 1K, con una sottostima delle temperature estive ed una sovrastima di quelle invernali. Tali risultati sono in linea con il livello di accuratezza raggiungibile anche da altri software di simulazione più complessi (Bueno et al., 2014).

Il modello UWG è stato anche valutato rispetto alla capacità di permettere simulazioni energetiche urbane che tengano in conto dell'effetto dell'isola di calore (Street et al. 2013). In tal caso risulta idoneo per una più corretta valutazione della domanda energetica annuale, consentendo una riduzione dell'errore rispetto all'utilizzo di dati meteorologici normalmente misurati agli aeroporti, sia per edifici per uffici che per edifici residenziali.

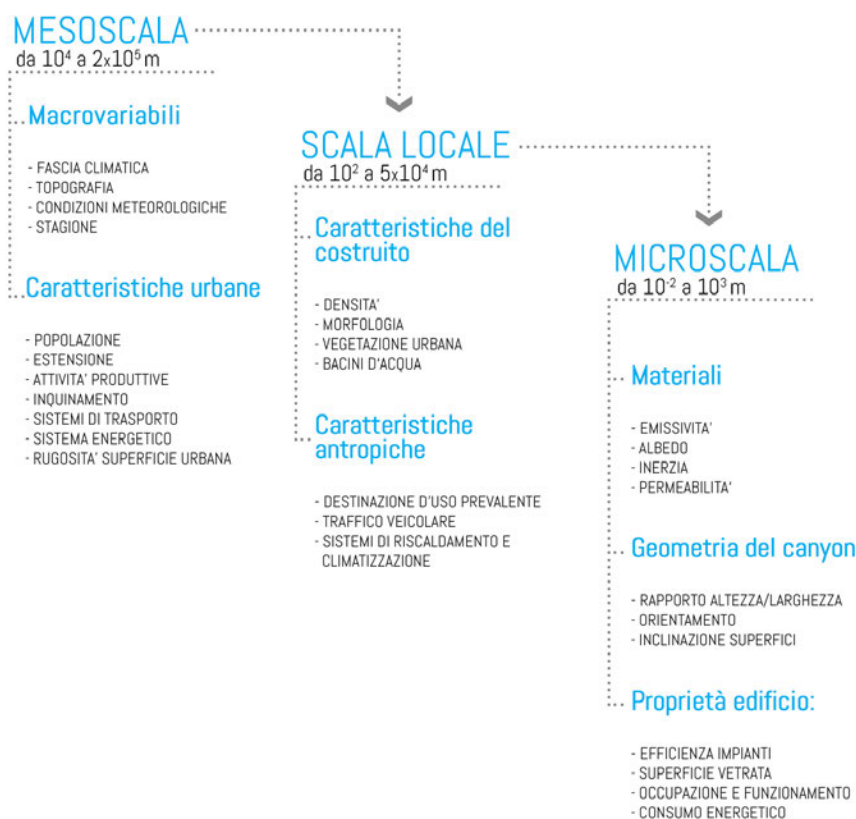
**Tabella 11** Risultati dei precedenti studi di validazione, rispetto a misurazioni a Singapore (Bueno, 2014) e Tolosa e Basilea (Bueno, 2013). L'errore del modello è stato valutato con il "Root mean square error" (RMSE) e il "Mean Bias Error" (MBE).

SINGAPORE					BASILEA E TOLOSA			
SITO	RMSE (k) Febbraio	MBE (k)	RMSE (k) Luglio	MBE (k)	Mese	RMSE (k)	MBE (k)	UHI <sub>max</sub> (k)
Punggol	1.1	0.5	1.2	0.1	<b>BUBBLE</b>			
Bideford Rd	1.3	0.3	1.4	-0.7	Estate	0.9	-0.6	5.2
Penang Rd	1.3	0.8	1.1	0.2	<b>CAPITOUL</b>			
Kim Cheng Rd	1.2	0.3	1.2	-0.2	Estate	0.7	0.2	3.6
Pasir Ris Dr	1.6	1.0	1.3	-0.1	Autunno	0.8	-0.1	2.5
Tampines St	1.3	0.6	1.3	-0.2	Inverno	1.1	-0.2	2.4
Limau Grove	1.1	0.4	1.2	-0.2				

#### 4.1.2. Parametri e scale di riferimento

L'individuazione delle variabili maggiormente influenti sul fenomeno dell'isola di calore dipende dalla scala di analisi del fenomeno stesso, nonché da alcune condizioni al contorno di tipo geografico e morfologico, ovvero le macro-variabili che influenzano il clima di una determinata regione. L'isola di calore si manifesta infatti in tutte le realtà urbane di medie e grandi dimensioni, ma con caratteristiche diverse in funzione della fascia climatica e delle caratteristiche geografiche che influenzano il clima sia a scala regionale che urbana (orografia, bacini idrografici, distanza dal mare...).

L'intensità dell'isola di calore non è però omogenea nell'area urbana, bensì possiede una distribuzione spaziale che dipende dalle caratteristiche morfologiche e di densità del costruito, dalla natura delle superfici in termini di permeabilità e proprietà termico-radiative e dalla



**Figura 95** Variabili influenti nello studio del clima urbano alle differenti scale di analisi: mesoscala, scala locale e microscala. La scala locale e la microscala possiedono un dominio orizzontale che, in parte, si interseca. Fonte: elaborazione propria

concentrazione di calore antropogenico derivante dal traffico veicolare e dai sistemi di climatizzazione degli edifici.

La temperatura dell'aria in uno specifico canyon urbano è infatti influenzata dalle caratteristiche dell'intorno urbano, per un raggio fino a circa 500 m (Stewart & Oke, 2012). La morfologia e la densità dell'edificato, la presenza di vegetazione o acqua e la destinazione d'uso prevalente della porzione di città presa in considerazione sono quindi le categorie di parametri determinanti sull'andamento delle temperature alla scala locale.

Il set di parametri di input per il calcolo di UWG comprende 4 categorie, che fanno riferimento a 4 scale differenti: "Reference site", "Urban Area", "Building" e "Elements".

I parametri "Reference site" individuano la collocazione geografica della città (latitudine e longitudine) e la grandezza dell'area urbana (raggio della città), ma non contengono alcuna informazione riguardo le caratteristiche geomorfologiche dell'area (rilievi, vicinanza al mare, dislivelli...). Il clima della regione, le condizioni meteorologiche e l'andamento orario delle variabili microclimatiche è contenuto nei dati di input che fanno riferimento alla stazione meteorologica rurale.

I parametri della categoria "Urban area" fanno riferimento al dominio di intersezione tra la scala locale e la microscala ( $5 \times 10^2 \text{ m} < d < 10^3 \text{ m}$ ). In questa categoria di variabili rientrano i parametri medi di morfologia e densità dell'edificato, la presenza di vegetazione (percentuale di superficie alberata e vegetale) e l'entità del calore antropogenico dovuto al traffico. Il modello però non considera l'eventuale presenza di bacini d'acqua nell'area urbana di riferimento.

Infine i parametri delle categorie "Building" e "Elements" descrivono nel dettaglio le caratteristiche dell'edificato, ed in particolare le proprietà delle superfici urbane (albedo ed emissività), la stratigrafia di tetti, pareti e strade, la percentuale di superfici vetrate, i carichi termici interni, la ventilazione, l'infiltrazione ed infine il tipo ed il funzionamento dei sistemi di riscaldamento e climatizzazione dell'edificio tipo dell'area urbana analizzata. L'insieme dei parametri vengono utilizzati da UWG per calcolare il consumo energetico dell'edificato e, proporzionalmente, il

» **PARAMETRI "REFERENCE SITE"**

» **PARAMETRI "URBAN AREA"**

» **PARAMETRI "BUILDING" E "ELEMENTS"**

calore di scarto immesso nella canopia urbana dagli edifici.

Il parametri di input per la simulazione sono in tutto 58, ma non tutti possiedono la stessa rilevanza. Nell'allegato 3 della tesi si presenta un'analisi di sensibilità del modello alle principali variabili in gioco, ovvero

1. Raggio della città
2. Parametri morfologici e di densità
3. Presenza di alberature
4. Albedo delle superfici
5. Proprietà termiche della parete
6. Presenza dei sistemi di aria condizionata

Le analisi di sensibilità sono state condotte considerando l'intervallo di variazione che assume ciascun parametro nel contesto urbano di Roma e Barcellona. I risultati hanno mostrato una maggiore sensibilità del modello alle caratteristiche morfologiche e di densità del costruito e al calore di scarto dei sistemi di climatizzazione. Al contrario gli altri parametri (raggio città, alberature, albedo e proprietà termiche della parete) risultano molto meno influenti sull'intensità dell'isola di calore calcolata dal programma.

## 4.2. Validazione del modello UWG

Il modello UWG è già stato testato e validato per diverse realtà urbane dimostrando un buon comportamento nel calcolo delle temperature urbane orarie, con errori contenuti nei limiti di variabilità della temperatura rilevata in diverse localizzazioni della stessa area urbana (Bueno et al., 2013, 2014).

I paragrafi che seguono presentano un ulteriore studio di validazione del modello rispetto alle temperature osservate nei siti urbani di Roma e Barcellona precedentemente illustrati.

### 4.2.1. Metodologia

Il metodo di validazione consiste nell'utilizzare i dati misurati alle stazioni rurali di riferimento come input per il calcolo di UWG ed in seguito comparare l'accuratezza delle temperature stimate dal modello rispetto alle temperature misurate nelle stazioni meteorologiche urbane mediante opportuni indici statistici.

Obiettivo specifico della validazione è l'individuazione della capacità del programma di catturare l'effetto di isola di calore locale con un grado di approssimazione accettabile al fine di una più corretta valutazione della performance energetica dell'edificio in ambito urbano. Le stazioni rurali di riferimento sono pertanto l'aeroporto di Roma Ciampino per Roma e l'aeroporto di El Prat per Barcellona, siti comunemente utilizzati per l'acquisizione di dati meteorologici ai fini delle simulazioni energetiche.

Per ciascun sito urbano precedentemente analizzato è stata eseguita una simulazione con UWG, i cui risultati sono stati comparati con le temperature effettivamente misurate nei rispettivi siti urbani. In particolare verrà presentata la comparazione sia rispetto alle misurazioni alla quota dei tetti (Raval e Via Boncompagni), sia rispetto alla quota stradale (Via Arenula e campagna di misurazione a Barcellona).

A tal fine, per ciascun sito di misurazione sono stati calcolati i valori dei parametri necessari alla definizione del file di input per la simulazione. Particolare attenzione è stata rivolta al calcolo delle variabili più discriminanti, come risultante dalle analisi di sensibilità (vedea allegato 3) e pertanto alle variabili morfologiche riferite all'area urbana di riferimento (parametri Urban Area) ed alla definizione dei valori di *setpoint* per il raffrescamento estivo.

Per i siti rurali di riferimento (gli aeroporti) sono stati costruiti i file meteorologici in formato epw relativi all'anno a cui si riferiscono le misurazioni urbane, utilizzati come input per le simulazioni con UWG.

### 4.2.2. Calcolo dei parametri

#### PARAMETRI "URBAN AREA"

I parametri descrittivi dell'area urbana in questo caso si riferiscono all'area di influenza della stazione meteorologica e riguardano le caratteristiche morfologiche del costruito, la percentuale di superficie alberata e l'entità del calore antropogenico prodotto. Le analisi di sensibilità hanno mostrato una particolare rilevanza dei parametri morfologici dell'edificio sull'intensità dell'isola di calore e pertanto occorre prestare particolare attenzione al calcolo di questi parametri per non inficiare il risultato della simulazione.

I parametri morfologici descrittivi dell'area oggetto di analisi sono i seguenti:

- **ALTEZZA MEDIA** (Average Building height -  $h_{bid}$ ): Altezza media degli edifici nell'area urba-



na, normalizzati in funzione dell'area costruita

- **RAPPORTO DI COPERTURA** (Site coverage ratio -  $\rho_{urb}$ ): Rapporto tra l'impronta degli edifici e l'area di riferimento del sito

- **RAPPORTO DI FACCIATA** (Façade to site ratio -  $VH_{urb}$ ): Rapporto tra le superfici verticali degli edifici e l'area di riferimento del sito

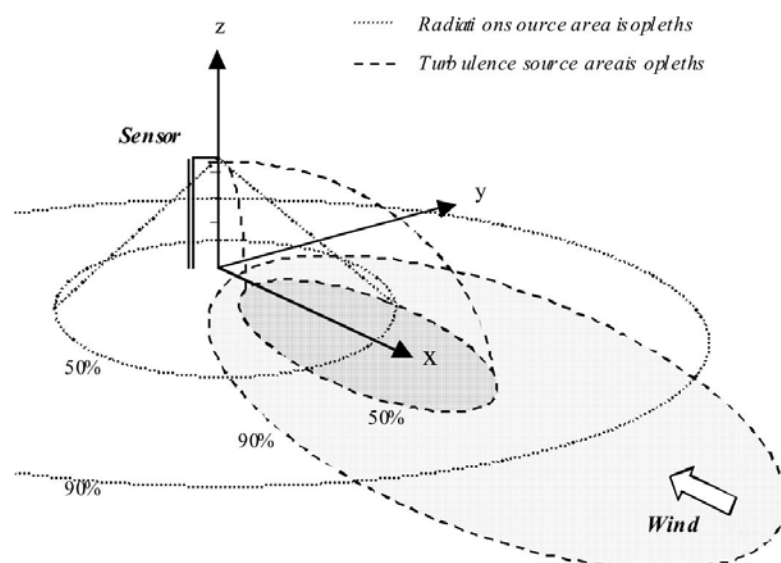
## » "FOOTPRINT" DELLA STAZIONE

Per il computo delle superfici urbane ed il calcolo dei parametri morfologici per ciascuna stazione meteorologica occorre preliminarmente definire l'area di influenza della stazione stessa. La porzione di area urbana che effettivamente contribuisce alla determinazione del clima rilevato da una stazione meteorologica urbana è noto come "footprint" della stazione (Oke, 2006). Un sensore di temperatura, collocato in un contesto urbano, è influenzato da una porzione limitata del contesto stesso, determinata in funzione del trasporto di calore sensibile derivante dalla direzione principale del vento (figura 96).

La porzione di riferimento cambia durante l'arco della giornata e dell'anno, al variare della direzione del vento. L'area circolare che, in condizione di atmosfera stabile, instabile e neutra, più caratterizza l'intera area dal punto di vista dei venti e quindi dal trasporto di calore, è pari ad un massimo di 500m (Oke & Stewart, 2012; Oke, 2006; Street et al., 2013). Vale la pena sottolineare che il calcolo dettagliato dell'area di "footprint" di una stazione meteorologica non è affatto semplice, in quanto dipende dalla direzione e velocità del vento che assume un andamento molto variabile durante il giorno e l'anno, soprattutto in un contesto urbano (Kljun et al., 2004; Schmid, 2002).

Come prima approssimazione, per questo studio è stato individuato un dominio circolare di 500m intorno alla stazione meteorologica, di cui è stata considerata solo una porzione in funzione delle direzioni dominanti dei venti durante l'arco dell'anno. Le direzioni dominanti dei venti nell'area urbana si riferiscono ai dati dall'osservatorio meteorologico di Collegio Romano per Roma e dalla stazione meteorologica di Raval per Barcellona, entrambe site nel centro città. A Roma la direzione principale del vento è Nord in inverno e Sud-ovest in estate, per Barcellona Nord-Ovest in Inverno e Sud-Sudovest in estate. Esclusivamente per il caso di studio di Via Arenula, in cui il sensore di temperatura è collocato al livello della strada, è stata utilizzata la completa porzione circolare di 500m intorno alla medesima stazione, in quanto la direzione e la velocità del vento all'interno del canyon urbano è profondamente alterata dalla morfologia dell'edificio stesso.

Sulla base dei dati GIS e di elaborazioni con il software gvSIG (Asociación GvSIG, 2015) e Au-



**Figura 96** Rappresentazione dell'area di influenza ("Source area" o "Footprint") di un radiometro (area circolare) e di un termometro (ellissi). Fonte: WMO, Oke 2006:



RAVAL



< 2 piani    2-3 piani    4-5 piani    6-8 piani    9-12 piani    > 12 piani

GRACIA



0 100 200 500

VIA BONCOMPAGNI



< 6m    6-11m    11-17m    17-25m    25-33m    > 33m

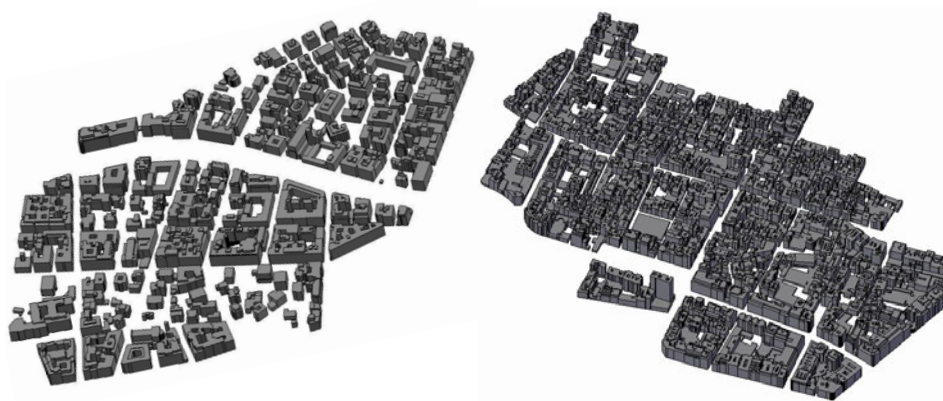
VIA ARENULA



0 100 200 500



**Figura 97** Nella pagina accanto: individuazione dell'area di riferimento per il calcolo dei parametri morfologici in ciascuno dei 4 siti analizzati. Gli angoli dei settori presi in considerazione sono 180°- 315° per Barcellona (Direzione prevalente vento Sud-Sud Ovest e Nord Ovest) e 225° - 360° per Roma (Direzione prevalente vento Sud Ovest e Nord).



**Figura 98** Costruzione del modello CAD (Via Boncompagni e Gracia) per il computo delle superfici urbane ed il calcolo dei parametri morfologici

#### Parametri morfologici aree

	Raval	Boncompagni	Arenula	Gracia
<b>Area Urbana di riferimento</b>	468941	391717	785398	359563
<b>Superficie costruita</b>	295912.6	174944.9	386997	199385.8
<b>Superficie verticale</b>	1028893.9	651295.9	1128397.8	821464.3
<b>Altezza media edificato</b>	<b>16.7</b>	<b>20.1</b>	<b>19.9</b>	<b>15.3</b>
<b>Rapporto di copertura</b>	<b>0.63</b>	<b>0.45</b>	<b>0.49</b>	<b>0.55</b>
<b>Rapporto di facciata</b>	<b>2.19</b>	<b>1.66</b>	<b>1.44</b>	<b>2.28</b>

**Tabella 12** Parametri morfologici relativi alle 4 stazioni meteorologiche urbane

toCAD®, è stato facilmente ricreato il modello morfologico digitale dell'area oggetto di studio. Su tali modelli è stato quindi effettuato il computo delle superfici (area coperta dagli edifici, area delle facciate, altezza media degli edifici) per il calcolo dei parametri richiesti dal programma<sup>2</sup>.

La porzione di area alberata (parametro "tree coverage") è stata invece calcolata sulla base di immagini areali estrapolate da google map ed elaborate con AutoCAD®. Per i casi di studio analizzati, i valori variano tra il 7 ed il 12%.

Per il calcolo dei parametri relativi al calore antropogenico prodotto nell'area urbana si è fatto riferimento a ricerche e studi analoghi, ed in particolare ai lavori di Pigeon et al. e Sailor (Pigeon, 2007; Sailor, 2011); in analogia con il caso di Tolosa è stato valutato appropriato il valore di 8 W/m<sup>2</sup> per il calore antropogenico associato al traffico veicolare. Il calore antropogenico derivante dagli edifici viene invece stimato direttamente da UWG, sulla base delle caratteristiche dell'edificio tipo.

#### PARAMETRI "BUILDING"

I parametri della categoria "building" descrivono l'edificio tipo dell'area urbana analizzata rispetto al sistema di climatizzazione e riscaldamento utilizzato, alla percentuale di superfici vetrata in facciata, all'altezza media dell'interpiano ed ai carichi termici interni e scambiati per ventilazione ed infiltrazione. I parametri più significativi di questa categoria sono le temperature di funzionamento del riscaldamento invernale e della climatizzazione estiva che influiscono in maniera determinante sul consumo energetico dell'edificio e quindi sul calore di scarto rilasciato in atmosfera. Nell'ipotesi che non tutti gli immobili ricadenti nelle aree di riferimento siano dotate di un sistema di climatizzazione è stato scelto un valore della temperatura di raffrescamento diurno abbastanza elevato, pari a 26°C e l'assenza di raffrescamento meccanizzato durante la notte. La temperatura di riscaldamento è stata posta pari a 20°C sia durante il giorno che durante la notte per tutti i casi di studio. Gli altri parametri della categoria, meno

<sup>2</sup> La specifica di tutti i parametri di input utilizzati nelle simulazioni è riportata nell'allegato 4

incidenti nella determinazione dell'isola di calore da parte del programma sono pressoché uguali per le 4 aree studiate. In particolare la superficie vetrata è stata posta uguale al 30% della facciata, la ventilazione e l'infiltrazione sono stimate in 0.5 ricambi orari (ACH), i carichi interni sono pari a 5.8 W/mq notturni e 2.0 W/mq diurni per aree a principale destinazione residenziale (Via Boncompagni, Raval e Gracia) e 5 W/mq notturni e 30 W/mq diurni per aree a destinazione d'uso commerciale e uffici (Via Arenula).

### PARAMETRI “ELEMENTS”

I parametri della categoria “Elements” descrivono le caratteristiche termiche e radiative delle superfici del canyon tipo, vale a dire la strada, la parete ed il tetto e dell'area rurale di riferimento. Per ciascun elemento (strada, tetto, parete, sito rurale) occorre definire la percentuale di superficie verde, le caratteristiche di albedo ed emissività delle superfici esterne e le caratteristiche termiche (conduttività, diffusività e spessore) delle stratigrafie che li compongono.

Per quanto riguarda i 4 casi di studio, è possibile individuare caratteristiche simili rispetto alle proprietà termiche e radiative delle superfici, trattandosi di aree del tessuto urbano consolidato, caratterizzate da costruzioni perlopiù in muratura ad elevata inerzia termica con finitura a intonaco. Per un approfondimento dei parametri e dei valori considerati si rimanda all'allegato 3 della tesi.

Per le aree rurali di riferimento è stata calcolata la percentuale di superficie verde rispetto ad un'area di 500m intorno alla stazione meteorologica (figura 99).



**Figura 99** Footprint delle stazioni meteorologiche rurali di riferimento, rispettivamente all'aeroporto di Barcellona-El Prat e all'aeroporto di Roma Ciampino

### 4.2.3. Discussione dei risultati

Si riporta di seguito la comparazione tra le temperature osservate e quelle simulate distinguendo i casi in cui le temperature misurate si riferiscano alla quota dei tetti o della strada.

La valutazione del programma è stato effettuato sia sul calcolo delle temperature medie orarie dei mesi invernali ed estivi sia sulle temperature medie mensili.

Gli indici statistici utilizzati per la valutazione sono il Mean-Bias Error (MBE) ed il Root Mean Squared Error (RMSE). Il Mean Bias Error, dato da:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n}$$

e corrisponde all'errore assoluto medio del modello (media assoluta delle differenze tra le previsioni  $P_i$  e le osservazioni  $O_i$ ) ma conserva il segno delle differenze; viene pertanto utilizzato in quanto indicativo della sistematica sovrastima o sottostima del modello rispetto alle

osservazioni. L'RMSE è pari alla radice quadrata dell'errore quadratico medio:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

vale a dire una stima della discrepanza tra i dati previsti, ovvero calcolati dal modello, e misurati. L'unità di misura dei suddetti indici è uguale all'unità di misura delle osservazioni, pertanto nel nostro caso °C.

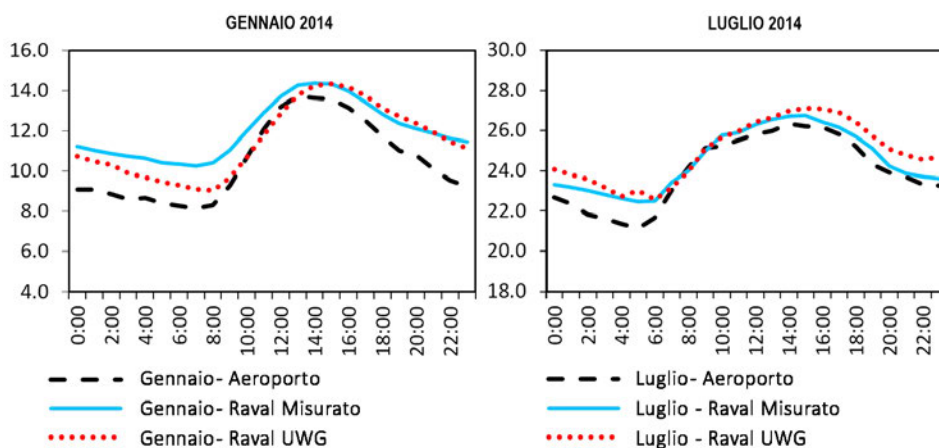
## TEMPERATURE MISURATE AL LIVELLO DEI TETTI: RAVAL E VIA BONCOMPAGNI

### RAVAL:

L'analisi di comparazione con le temperature misurate a Raval è stata condotta per tutto l'anno 2014, del quale si riportano i risultati più significativi dei mesi invernali ed estivi. La figura 100 rappresenta l'andamento delle temperature medie orarie calcolate da UWG ed osservate alla stazione meteorologica urbana e all'aeroporto. La comparazione della performance del programma rispetto alle temperature osservate restituisce un RMSE pari a 0.77 per gennaio e 0.56 per luglio, con un valore medio massimo dell'isola di calore misurata pari rispettivamente a 2.2 °C e 1.3°C. L'errore massimo si registra a dicembre, con un RMSE pari a 1.42 ed un MBE pari a -1.3, mentre l'errore minimo a giugno, con un RMSE di 0.41 ed un MBE di 0.1. L'errore del modello è pertanto contenuto tra i 0.4°C e 1.4°C, in linea con gli studi di validazione precedentemente pubblicati.

Dicembre è il mese invernale in cui si registra la più grande intensità di isola di calore a Raval, pari ad un massimo giornaliero di 2.8°C. In tal caso il modello sottostima significativamente le temperature. Anche a gennaio si registra una generale sottostima delle temperature, mentre a febbraio e nel resto dei mesi estivi, il modello tende a sovrastimare le temperature urbane,

**Figura 100** Raval: temperature medie orarie mensili nei mesi di gennaio e luglio 2014. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Raval (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa).



**Tabella 13** Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Raval: Mean-Bias Error e il Root Mean Squared Error.

Raval 2014						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
MBE	-1.3	-0.5	0.7	0.1	0.4	0.7
RMSE	1.42	0.77	0.86	0.41	0.56	0.79

	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
T Aeroporto	9.9	10.5	11	22.2	24	24.7
UHI Misurato	2	1.5	1.4	0.9	0.6	0.1
UHI UWG	0.7	1	0.7	1	1	0.8

**Tabella 14** Isola di calore media mensile misurata e simulata a Raval



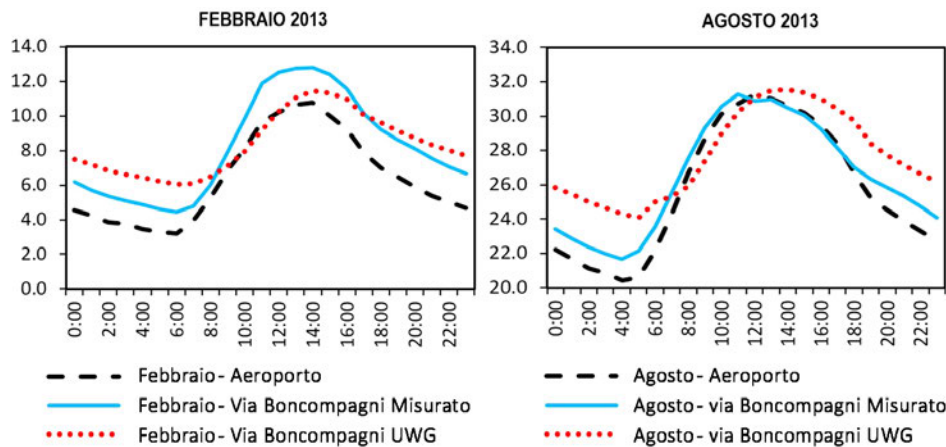
come indicato dai valori di MBE nella tabella 13.

Comparando la stima dell'UHI media mensile calcolata dal modello rispetto a quella misurata (tabella 14), l'errore relativamente più consistente riguarda il mese di agosto, durante il quale l'isola di calore misurata è pressoché nulla (0.1°C in media), mentre la stima del programma è pari a 0.8 °C. Come evidenziato nella prima parte del capitolo, il clima di Barcellona è fortemente influenzato dall'effetto della brezza durante i mesi estivi, che determina un abbattimento delle temperature nelle ore più calde della giornata. La stazione meteorologica di Raval, sita sulla copertura di uno degli edifici più alti dell'area, a soli 1,3Km di distanza dalla costa, risente fortemente dell'effetto termoregolatore del mare, misurando temperature pressoché costanti nella fascia orario della brezza marina. Tale effetto non è rilevato da UWG, che non contempla la vicinanza al mare o la presenza di caratteristiche geografiche e fisiche influenti sul clima urbano dell'intera città. La minor accuratezza del programma rispetto alla determinazione dell'andamento delle temperature estive è pertanto probabilmente da imputarsi a questa carenza.

### VIA BONCOMPAGNI

Analogamente per Via Boncompagni è stata effettuata la comparazione tra le temperature misurate e simulate per tutto l'anno 2013. In figura 101 si riporta l'andamento della giornata media invernale di febbraio ed estiva di agosto. Per questo caso di studio la performance del modello è peggiore, con un errore RMSE variabile tra 1.2°C e fino a 2.1°C a Luglio. Analogamente al caso di Raval, la maggiore discrepanza si verifica durante i mesi estivi, per i quali il modello sistematicamente sovrastima le temperature urbane rispetto a quelle misurate, determinando un errore relativamente più significativo rispetto ai mesi invernali (tabella 15).

Anche in questo caso è possibile effettuare una considerazione in merito, analoga al caso catalano. Per il calcolo dei parametri "Urban Area" si è fatto riferimento alla "footprint" della stazione meteorologica, individuata come la porzione di area urbana racchiusa nel raggio di circa



**Figura 101** VIA Boncompagni: temperature medie orarie mensili nei mesi di febbraio e agosto 20113. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Via Boncompagni (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa).

Boncompagni 2013						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
MBE	0.87	0.74	0.17	1.11	1.51	1.23
RMSE	1.51	1.2	1.36	1.84	2.10	1.90

	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
T Aeroporto	8.3	7.8	6.4	21.3	25.2	25.7
UHI Misurato	1.1	0.9	1.8	0.9	0.5	0.8
UHI UWG	2	1.6	1.9	2	2	2

**Tabella 15** Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Via Boncompagni: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error*.

**Tabella 16** Isola di calore media mensile misurata e simulata a Via Boncompagni.

**Figura 102:** Inquadramento urbano della stazione meteorologica (WS) di Via Boncompagni in cui è possibile vedere la vicinanza del parco di Villa Borghese



500m intorno alla stazione e delimitata in funzione dei venti dominanti nell'area urbana. Utilizzando tale procedimento, l'area urbana di riferimento risultava completamente e densamente edificata, con scarsissima presenza di vegetazione. Nella realtà, non appena oltre i 500m di distanza dalla stazione meteorologica troviamo il Parco di Villa Borghese, polmone verde di 80 ettari nel centro storico della città. Il parco si trova inoltre nel quadrante dei venti dominanti per Roma (Nord e Sud-Ovest) pertanto può contribuire in parte a determinare il clima rilevato dalla stazione meteorologica di Via Boncompagni. L'impossibilità di caratterizzare l'intorno urbano rispetto alle più rilevanti caratteristiche geografiche, idrografiche e orografiche della città di riferimento costituisce pertanto un limite del programma di calcolo, riducendo la validità dei risultati sono per porzioni urbane omogenee, non influenzate climaticamente da caratteristiche dell'intorno urbano quali la presenza di grandi parchi o bacini idrografici.

### COMPARAZIONE CON TEMPERATURE A LIVELLO STRADA

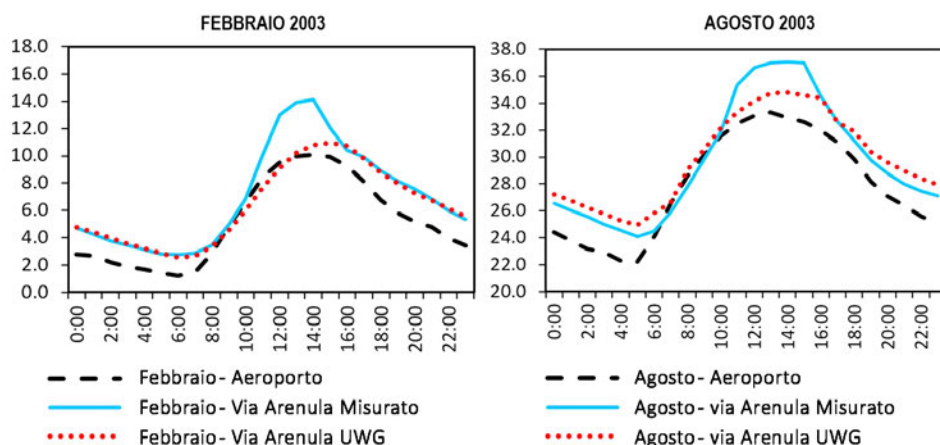
Come evidenziato nella prima parte del capitolo 3, le temperature misurate alla quota stradale sono tendenzialmente più elevate durante la parte centrale della giornata rispetto alle temperature misurate al di sopra delle coperture degli edifici, sia in inverno che in estate. La comparazione della performance del programma rispetto ad entrambi i tipi di misurazioni permette di valutare se il calcolo eseguito sia più indicativo delle temperature nel canyon o al di sopra dei tetti dell'area urbana.

### VIA ARENULA

Per il caso di studio di Via Arenula si riporta la comparazione tra le temperature misurate e simulate condotta per tutto l'anno 2003. In figura 103 si riporta la grafica dell'andamento della giornata media invernale di febbraio ed estiva di agosto. L'errore RMSE in questo caso vale  $1.43^{\circ}\text{C}$  per febbraio e  $1.25^{\circ}\text{C}$  per agosto, a fronte di un'intensità media massima oraria di isola di calore pari a  $4.1^{\circ}\text{C}$  a febbraio e  $4.4^{\circ}\text{C}$  ad agosto. Dai grafici in figura 103 è però possibile notare che l'errore del programma è decisamente più consistente durante la parte centrale della giornata, tra le 10:00 e le 16:00 (UTC), mentre nel tardo pomeriggio fino alle prime ore del mattino l'errore è quasi nullo.

In effetti il programma UWG calcola il valore della temperatura uniforme nel canyon urbano, mentre la misurazione è stata effettuata a circa 2m da terra, dove si risente in maniera maggiormente diretta del surriscaldamento della strada e del calore sprigionato dal traffico veicolare. Come prevedibile, la parametrizzazione del modello UWG risulta insufficiente a cogliere l'effetto di tali caratteristiche specifiche del sito di misurazione che possono influire sul microclima locale.

Ad ogni modo le temperature calcolate consentono una stima dell'isola di calore media mensile molto buona per il sito di Via Arenula, come riportato nella tabella 18.



**Figura 103** Via Arenula: temperature medie orarie mensili nei mesi di febbraio e agosto 2013. Comparazione tra temperature all'aeroporto (linea nera tratteggiata), temperature misurate a Via Arenula (linea azzurra) e temperature calcolate con UWG (linea puntinata rossa).

Arenula 2013						
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
MBE	-0.05	-0.10	-0.65	0.56	0.25	0.08
RMSE	0.63	0.56	1.43	1.56	1.28	1.25

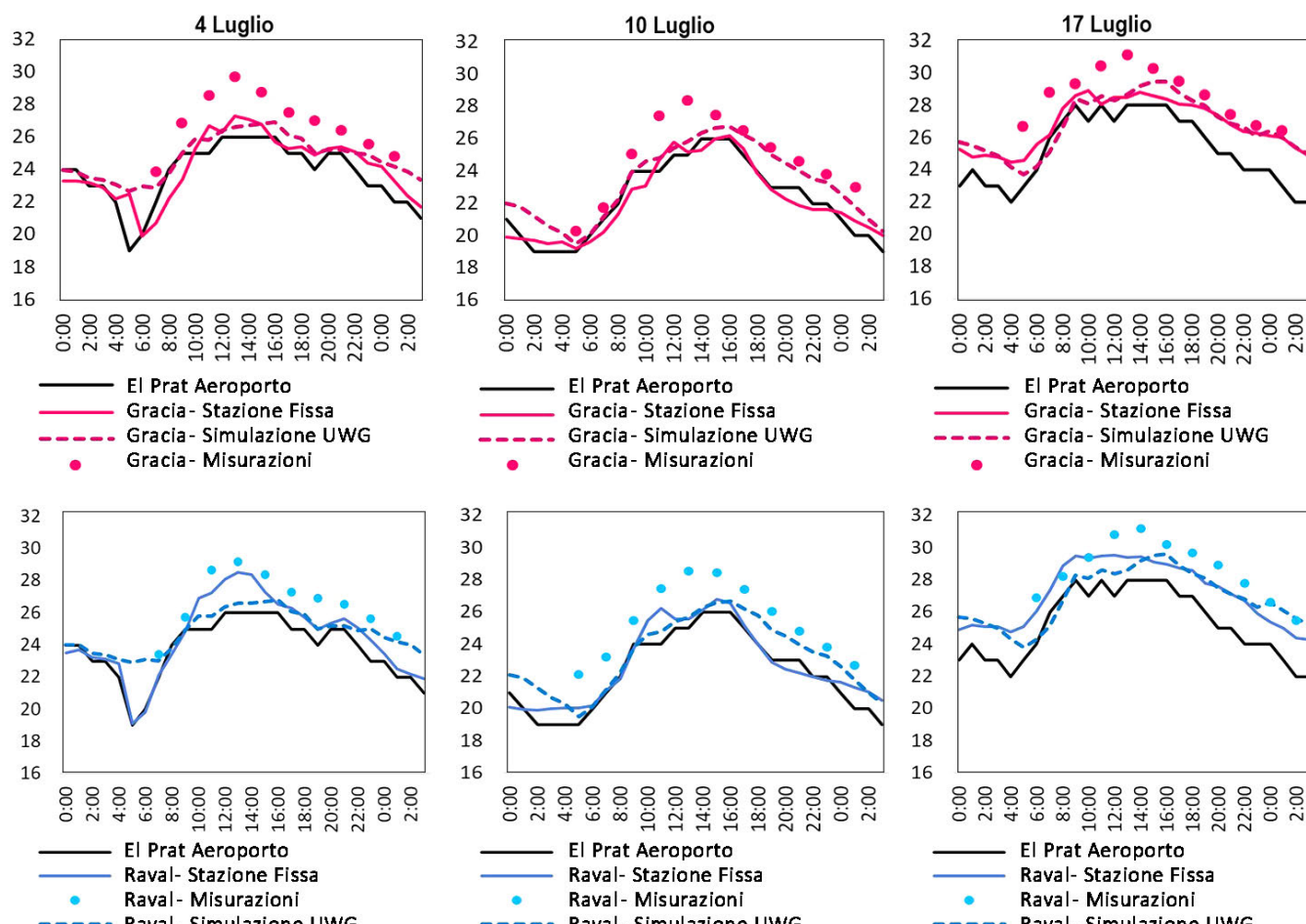
	Dicembre	Gennaio	Febbraio	Giugno	Luglio	Agosto
T Aeroporto	9.9	8.3	5.2	26.4	27.1	27.9
UHI Misurato	1.2	1.1	1.8	1.8	1.8	1.9
UHI UWG	0.7	1	1.2	2.3	2	1.9

**Tabella 17** Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature medie mensili misurate a Via Arenula: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error*.

**Tabella 18** Isola di calore media mensile misurata e simulata a Via Arenula.

**Figura 104** In basso: campagna di misurazione a Gracia e Raval: Comparazione temperature misurate nei canyon (media delle misurazioni), alla rispettiva stazione meteorologica in copertura (linea rosa), simulate con UWG (linea tratteggiata) e all'aeroporto (linea nera)

#### CAMPAGNA DI MISURAZIONE LUGLIO 2014



**Tabella 19** Performance del modello UWG rispetto all'andamento orario delle temperature misurate alla quota stradale ed in copertura nei quartieri di Raval e Gracia a Luglio 2014: *Mean-Bias Error* e il *Root Mean Squared Error*

Raval e Gracia – Luglio 2014								
	Raval Tetto		Raval Strada		Gracia tetto		Gracia strada	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
<b>4 Luglio</b>	0.16	1.32	-1.38	1.62	0.55	1.02	-1.67	1.85
<b>10 Luglio</b>	0.66	1.17	-1.66	1.83	1.16	1.35	-1.05	1.31
<b>17 Luglio</b>	-0.32	0.98	-1.35	1.78	0.01	0.62	-1.44	1.80

#### CAMPAGNA DI MISURAZIONE A BARCELLONA

Si riportano infine i risultati delle temperature calcolate da UWG per i giorni della campagna di misurazione dell'aria svoltasi a Gracia e Raval a luglio 2014. Questa ulteriore comparazione conferma la sottostima del modello rispetto alle temperature che si registrano alla quota stradale, soprattutto durante le ore centrali della giornata, come avviene per il caso di Via Arenula.

Tuttavia tale errore era previsto in partenza, in quanto la comparazione del valore medio della temperatura del canyon calcolato da UWG non può corrispondere alla rilevazione puntuale in prossimità della strada, soprattutto di giorno quando è presente la radiazione solare. In effetti analizzando l'errore medio del programma rispetto alle temperature misurate nei due quartieri (figura 19) si nota una sistematica sottostima rispetto a quelle misurate alla quota stradale (MBE negativo) ed una sovrastima rispetto a quelle misurate alla quota dei tetti.

#### 4.2.4. Commento e conclusioni

Il processo di validazione del programma ha confermato un grado di errore in linea con i precedenti studi, con un RMSE compreso tra circa 0.5 e 1.5 °C rispetto al calcolo delle temperature orarie mensili sia in inverno che in estate. L'errore tende ad aumentare (fino a circa 2 °C) in condizioni urbane disomogenee per gradi di densità e presenza di vegetazione, quale il caso di Via Boncompagni.

L'affidabilità del calcolo effettuato da UWG dipende pertanto dalla posizione del sito all'interno della città e dalle condizioni al contorno. Il programma risulta idoneo per il calcolo delle temperature in aree urbane centrali, in un contesto morfologicamente omogeneo per densità e presenza di vegetazione.

Si conferma comunque la validità del programma rispetto alla determinazione di temperature medie mensili urbane più accurate e realistiche rispetto ai dati degli aeroporti, risultando utile al fine di simulazioni energetiche che tengano maggiormente in conto dell'effetto dell'isola di calore. L'andamento delle temperature nell'area urbana è ben simulato dal modello, sia rispetto ai minimi che ai massimi, in accordo con i dati misurati sia a Roma che a Barcellona.

Il valore calcolato da UWG è da intendersi come la temperatura media omogenea dell'aria nel canyon, come specificato dall'autore stesso (Bueno et al., 2013). L'UWG non è in grado, infatti, di calcolare il microclima a quote prossime a quelle della strada e sistematicamente sottostima tali temperature durante le ore più calde della giornata. Probabilmente nel calcolo viene sottostimato il fenomeno del trapping radiativo diurno.

Al contrario, il calcolo con UWG tende a sovrastimare le temperature rispetto a quelle rilevate al di sopra dei tetti (Raval, Boncompagni), che sono relativamente influenzate dai meccanismi termici all'interno del canyon e risentono in maniera molto più consistente dell'effetto della brezza e della velocità del vento in generale. Il programma pertanto non considera adeguatamente l'effetto della brezza marina.

In definitiva, possiamo affermare che, al fine di una più accurata simulazione energetica, lo



strumento appare sufficientemente adeguato, apportando migliorie all'accuratezza del risultato, mentre non è in grado di simulare il microclima alla quota stradale di siti specifici all'interno del tessuto urbano.

Vale la pena sottolineare che la scelta di un idoneo dominio di calcolo dei parametri morfologici risulta determinante al fine della simulazione dell'isola di calore, soprattutto nel caso di aree urbane non omogenee dal punto di vista della morfologia e densità dell'edificato, in cui il calcolo della media dei valori potrebbe risultare molto distante dal caso reale. Tale punto costituisce tutt'oggi un limite dei modelli di calcolo che si fondano su una descrizione parametrica dell'intera città o di una specifica area urbana, che risultano applicabili in presenza di un certo grado di omogeneità del tessuto e degli edifici presenti.

Si raccomanda pertanto un'attenta analisi del contesto urbano prima del calcolo con UWG, per non incorrere in risultati non realistici. Se il sito rispetta condizioni di simmetria rispetto alla città ed omogeneità rispetto alle caratteristiche del costruito, allora la simulazione permette una stima decisamente più realistica delle variabili microclimatiche rispetto ad un file meteorologico standard e risulta particolarmente utile per una più veritiera simulazione e stima della domanda energetica per l'edificato in ambito urbano.



- Asociación GvSIG. (2015). GVSIG 2.2 - User guide. Retrieved from [www.gvsig.com](http://www.gvsig.com)
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., & Pigeon, G. (2013). The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(4), 269–281. doi:10.1080/19401493.2012.718797
- Bueno, B., Roth, M., Norford, L., & Li, R. (2014). Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale. *Urban Climate*, 9, 35–53. doi:10.1016/j.uclim.2014.05.005
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J. J., Belcher, S. E., ... Zhang, N. (2010). The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1268–1292. doi:10.1175/2010JAMC2354.1
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., & Schmid, H. P. (2004). A simple parameterisation for flux footprint prediction. *Boundary-Layer Meteorology*, 112, 503–523.
- Masson, V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Liousse, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., ... Tulet, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3), 135–157. doi:10.1007/s00703-008-0289-4
- Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods, Report No.(WMO/TD-No. 1250).
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., & Masson, V. (2007). Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27, 1969–1981. doi:10.1002/joc.1530
- Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, a., Clappier, a., ... Voogt, J. a. (2005). BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project. *Theoretical and Applied Climatology*, 81(3-4), 231–261. doi:10.1007/s00704-004-0117-9
- Sailor, D. J. (2011). A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment. *International Journal of Climatology*, 31(2), 189–199. doi:10.1002/joc.2106
- Schmid, H. P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1-4), 159–183. doi:10.1016/S0168-1923(02)00107-7
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Street, M., Reinhart, C., Norford, L., & Ochsendorf, J. (2013). Urban heat island in Boston – An evaluation of urban air- temperature models for predicting building energy use. In *Proceedings of BS2013:13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (pp. 1022–1029). Chambéry, France.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. doi:10.3354/cr030079

